

Année 1952.  
N° d'ordre : 1.

# THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES D'ALGER

en vue de l'obtention

du grade d'Ingénieur-Docteur

par

**Pierre-Clément JOLIVET**

Ingénieur de l'École supérieure d'Électricité,  
né à Blida, département d'Alger, le 17 septembre 1902.

PREMIÈRE THÈSE : Sur une nouvelle machine  
électrostatique à influence

DEUXIÈME THÈSE : Proposition donnée par la Faculté

Soutenues le 9 juin 1952, devant la Commission d'examen

MM. GUNTZ,

WOLFERS,

CRAUSSE,

BLANC-LAPIERRE.

*Président.*

*Examineurs.*



12, Place Henri-Bergson, 12

PARIS (VIII<sup>e</sup>)

1953



# THÈSES

présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES D'ALGER

en vue de l'obtention

du grade d'Ingénieur-Docteur

par

**Pierre-Clément JOLIVET**

Ingénieur de l'École supérieure d'Électricité,  
né à Blida, département d'Alger, le 17 septembre 1902.

PREMIÈRE THÈSE : **Sur une nouvelle machine  
électrostatique à influence**

DEUXIÈME THÈSE : **Proposition donnée par la Faculté**

Soutenues le 9 Juin 1952, devant la Commission d'examen

MM. GUNTZ,

*Président.*

WOLFERS,

CRAUSSE,

BLANC-LAPIERRE.

} *Examineurs.*



12, Place de Henri-Bergson, 12  
**PARIS (VIII<sup>e</sup>)**

1953

# UNIVERSITÉ D'ALGER

## FACULTÉ DES SCIENCES

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| <i>Doyen</i> .....      | MM. ROYER. |
| <i>Assesseur</i> .....  | DE POSSEL. |
| <i>Secrétaire</i> ..... | SEGOND.    |

### Professeurs.

|                                                           |                |
|-----------------------------------------------------------|----------------|
| Analyse supérieure .....                                  | MM. DE POSSEL. |
| Astronomie et Astrophysique .....                         | MEYER.         |
| Mathématiques .....                                       | BOURION.       |
| Mécanique rationnelle et appliquée .....                  | D'ORGEVAL.     |
| Physique générale .....                                   | WOLFERS.       |
| Physique théorique .....                                  | BLANC.         |
| Physique industrielle .....                               | LAPIERRE.      |
| Chimie générale .....                                     | CRUSSE.        |
| Chimie appliquée .....                                    | ROLLET.        |
| Biologie générale et appliquée .....                      | GUNTZ.         |
| Botanique générale et appliquée .....                     | ROSE.          |
| Botanique agricole et expérimentale .....                 | GUINCHET.      |
| Géologie .....                                            | KILLIAN.       |
| Minéralogie et cristallographie .....                     | TERMIER.       |
| Zoologie générale .....                                   | ROYER.         |
| Géologie appliquée à l'agriculture et à l'industrie ..... | BERNARD.       |
|                                                           | LAFFITTE.      |

### Professeurs sans chaire.

|                         |                           |
|-------------------------|---------------------------|
| Physique M.P.C. ....    | MM. SAVORNIN.             |
| Chimie .....            | BERLANDE.                 |
| Chimie générale .....   | M <sup>lle</sup> PEYTRAL. |
| Physique (P.C.B.) ..... | MM. PERROT.               |
| Zoologie générale ..... | HOLLANDE.                 |

### Maîtres de conférences.

|                                             |              |
|---------------------------------------------|--------------|
| Mathématiques générales (Ch. des Fons) ..   | MM. MEYNIEUX |
| Mathématiques, physique, chimie (M.P.C.) .. | TORTRAT.     |
| Chimie appliquée .....                      | LEJEUNE.     |
| Botanique agricole .....                    | OZENDA.      |
| Géologie et paléontologie .....             | LUCAS.       |

### Maîtres de conférences adjoints.

|                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| Chimie appliquée ..... | M. SIROT.                 |
| Botanique .....        | M <sup>me</sup> GAUTHIER. |

### Honorariat.

|                  |                             |
|------------------|-----------------------------|
| MM. ROUYER ..... | <i>Professeur et Doyen.</i> |
| CARRUS .....     | <i>Professeur.</i>          |
| DALLONI .....    | <i>Professeur.</i>          |
| DARMOIS .....    | <i>Professeur.</i>          |
| FOIX .....       | <i>Professeur.</i>          |
| HENRIOT .....    | <i>Professeur.</i>          |
| SAVORNIN .....   | <i>Professeur.</i>          |
| VERAIN .....     | <i>Professeur</i>           |



## A la mémoire de mon père

---

## A la mémoire de mes maîtres

H. CHAUMAT, professeur de mesures électriques  
à l'École supérieure d'Électricité.

P. JANET, membre de l'Institut, directeur de  
l'École supérieure d'Électricité.

J. SUDRIA, directeur-fondateur de l'École  
spéciale de Mécanique et d'Élec-  
tricité, à Paris.



Digitized by the Internet Archive  
in 2026

[https://archive.org/details/IA41552216\\_0032](https://archive.org/details/IA41552216_0032)

# Sur une nouvelle machine électrostatique à influence

## Introduction

L'étude du fonctionnement des machines électrostatiques à influence ne se présente pas seulement comme une curiosité d'un intérêt croissant avec l'évolution des théories modernes sur l'électricité. La possibilité de nouveaux perfectionnements a conféré à ces machines, en même temps qu'un regain d'actualité, une place d'avenir partout où il s'agit de fournir une haute tension continue. Par exemple : les essais des isolateurs et des câbles à haute tension, l'étalement des électromètres, l'électrisation des poudres, la captation des poussières, l'orientation des abrasifs au collage, la peinture au pistolet dans un champ électrique, la charge de condensateurs pour ondes de choc, l'allumage des moteurs à explosion, le microscope électronique ou protonique, le télescope électronique de demain, les tubes émetteurs et récepteurs de télévision, les tubes à rayons X de radioscopie, sinon de radiographie, l'électricité médicale, les expériences d'enseignement et peut-être les mesures météorologiques, toutes applications pour lesquelles ces machines présentent l'avantage de fournir sans danger pour l'opérateur des tensions élevées de l'ordre d'une centaine de kilovolts.

Il faut à cet effet créer des machines électrostatiques assez puissantes et robustes qui restent d'un prix avantageux par rapport aux autres sources où la haute tension est obtenue avec des transformateurs et des redresseurs.

Le point de vue énergétique domine la question.

Tandis qu'en électromagnétisme, la transformation d'énergie s'effectue par circulation de charges électriques dans le conducteur coupant les lignes de force d'un champ magnétique, on sait que, dans les machines électrostatiques, les charges restent momentanément prisonnières sur des transporteurs en mouvement qui « gravissent » d'énormes différences de potentiel.

Les transporteurs les plus divers ont été utilisés : plateaux ou cylindres isolants, parties métalliques isolées les unes des autres, gouttes d'eau dans un dispositif de Lord Kelvin, grains de sable dans une machine de Fleming, courroie transporteuse de van de Graaff, particules isolantes ou conductrices entraînées par un courant d'air selon la technique utilisée par M. Pauthenier et M<sup>me</sup> Moreau-Hanot.

Cependant, les machines électrostatiques et les machines électromagnétiques présentent un point commun : compte tenu du facteur vitesse linéaire, le flux d'énergie par unité de surface de la partie tournante ne peut être élevé que si la densité d'énergie est elle-même élevée dans l'espace avoisinant [1] <sup>(1)</sup>. C'est ainsi qu'en électrostatique, la puissance d'une machine est relativement faible lors du fonctionnement dans l'air à la pression atmosphérique où le champ électrique atteint dans certaines conditions favorables 45 kV : cm, soit 150 unités électrostatiques C.G.S. par centimètre, ce qui correspond à une densité d'énergie de 900 ergs par centimètre cube ou près de  $10^{-4}$  J : cm<sup>3</sup>, tandis que dans un entrefer de dynamo où règne par exemple une induction magnétique résultante de 15 000 gauss, la densité d'énergie est dix mille

fois plus élevée avec 9 millions d'ergs par centimètre cube ou presque 1 J : cm<sup>3</sup>. Aussi a-t-on été conduit à faire fonctionner des machines électrostatiques dans des fluides capables de supporter une haute densité d'énergie et notamment dans des gaz comprimés. Il convient alors d'assimiler la puissance maximum obtenue à l'aide d'une machine fonctionnant dans un gaz tel que l'air comprimé au produit du multiplicande représentant la puissance maximum obtenue dans l'air à la pression atmosphérique, par un facteur multiplicateur qui dépend du nouveau milieu.

Les récents travaux de M. N. Félici, au Laboratoire d'Électrostatique et de Physique du Métal, et du professeur Néel, à la Faculté des Sciences de Grenoble, mettent en lumière que les résultats obtenus diffèrent considérablement suivant le type de machine, de sorte que la puissance ne croît pas toujours comme la densité d'énergie qui, dans certaines conditions, est sensiblement proportionnelle au carré de la pression évaluée par exemple en atmosphères [2].

Pour obtenir des facteurs multiplicateurs de plusieurs centaines d'unités dans l'air comprimé à 30 ou 40 atmosphères, N. Félici a été conduit à utiliser des transporteurs conducteurs arrondis autour desquels le champ électrique peut acquérir une énorme valeur, sans risquer d'en faire évader les charges électriques.

Avec les machines à transporteur isolant employées jusqu'à présent (plateau, courroie), il n'en est plus de même parce que le champ n'est plus normal au transporteur. Des éléments du transporteur se trouvent alors soumis à un champ tangentiel et celui-ci ne peut pas dépasser une certaine valeur au-delà de laquelle il se produit un glissement des charges sur la surface isolante. D'après N. Félici, ce phénomène de glissement se déclenche d'ailleurs pour une valeur du champ qui est indépendante de la rigidité diélectrique du milieu, de sorte que le facteur multiplicateur n'est pas élevé, même dans l'air comprimé sous haute pression.

Malgré cette infériorité du multiplicateur, certaines machines à transporteur isolant peuvent avoir dans des gaz comprimés une puissance notable grâce à un multiplicande élevé dû à des dispositions qui assurent le maximum d'efficacité des organes tout en évitant les difficultés d'isolement auxquelles on se heurte souvent en électrostatique.

Si l'on envisage le fonctionnement classique de toute machine où le transporteur est influencé par des inducteurs fixes comportant des armatures conductrices recouvertes ou non d'isolant, on sait qu'il faut nécessairement une différence de potentiel, d'ailleurs élevée, entre l'armature de l'inducteur considéré et le peigne en regard de cet inducteur. Cette nécessité, qui constitue le problème de l'excitation, auquel de nombreuses solutions ont été apportées, reste cependant une cause de complication et présente des difficultés particulières dans un certain type de génératrice qui serait avantageux. Ces difficultés proviennent de ce que le problème de l'excitation doit être résolu avec des différences de potentiels et non avec des courants que l'on peut faire circuler comme il convient dans les bobines des machines électroma-

<sup>(1)</sup> Le chiffre entre crochet et ceux qui suivent se rapportent à la bibliographie annexée.

gnétiques. Or, l'inducteur à armature conductrice recouverte d'isolant se prête à un nouveau mode d'excitation que j'ai trouvé et grâce auquel l'inducteur peut influencer le peigne en regard quand la différence de potentiel entre l'armature et le peigne est nulle [3].

C'est ainsi qu'à partir de 1933, j'ai créé de nouvelles génératrices à plateau [4] munies de connexions déplaçables et basées sur ce mode d'excitation.

L'une de ces machines, construite pour fonctionner dans une enceinte hermétique et que j'ai expérimentée en 1939 a fourni plus de 50 W par plateau de 25 cm de diamètre tournant à la vitesse de 2 900 t : mn dans de l'air à la pression de 3 kg : cm<sup>2</sup>, ou dans de l'anhydride carbonique sous cette même pression au-dessus de l'atmosphère normale.

Cette puissance (soit 0,8 mA  $\times$  70 kV pour l'anhydride carbonique) relativement importante pour une machine électrostatique provenait d'un multiplicateur de pouvoir égal à environ 8 associé à un multiplicande de 7 W, puissance dans l'air à la pression atmosphérique obtenue avec un montage octopolaire qui se prête à une meilleure utilisation de l'enceinte que le montage bipolaire, ce dernier ne fournissant d'ailleurs que 5 W à la vitesse indiquée [5].

Ainsi, certaines machines à plateaux ont une puissance atteignant une valeur intéressante dans des gaz faiblement comprimés et il paraît utile de chercher à supprimer les

connexions déplaçables dans ces machines à inducteurs recouverts d'isolant. C'est à quoi j'ai consacré le présent travail en me bornant toutefois, en ce qui concerne l'expérimentation, au fonctionnement dans l'air à la pression atmosphérique.

Cette thèse est divisée en quatre parties :

La première partie est relative aux particularités de fonctionnement des machines à inducteurs recouverts d'isolant et conduit à poser un problème touchant à la recherche de perfectionnements.

La deuxième partie est consacrée à l'exposé du nouveau procédé pour résoudre ce problème.

La troisième partie se rapporte à l'expérimentation du nouveau procédé.

La quatrième partie montre une application sous forme d'une nouvelle génératrice dont le fonctionnement fait l'objet de diverses mesures.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à M. L. Verain, professeur honoraire de Physique Industrielle à la Faculté des Sciences d'Alger, qui m'a encouragé à poursuivre mes recherches en électrostatique depuis 1934.

Qu'il me soit permis de remercier ici mon frère, Jacques Jolivet, ingénieur I.A.A., grâce à qui j'ai pu me livrer à de longs travaux personnels dans notre atelier de Maison-Carrée.

## PREMIÈRE PARTIE : Particularités de fonctionnement des machines à inducteurs recouverts d'isolant

**I. Nouvelle classification des génératrice à influence.** — Il est entendu que le terme « inducteur » sert couramment à désigner l'armature conductrice qui influence le peigne à travers le plateau rotatif d'une machine à influence, quoique M. Félici ait préféré le terme « producteur » pour désigner l'organe équivalent dans ses machines à transporteurs conducteurs [2]. Par exemple, dans la machine représentée en figure 1, le peigne P et le plateau rotatif D sont influencés par l'inducteur I.

Les inducteurs dont l'armature est recouverte d'isolant peuvent être montés soit sur des machines classiques soit sur les machines particulières dont il sera question plus loin, mais l'ensemble de toutes ces machines doit trouver place dans toute classification complète des génératrices à influence.

J'ai montré que les fonctions accomplies par les peignes ou frotteurs pouvaient servir de base à une nouvelle classification [5].

Suivant la terminologie proposée, un peigne est dit « déverseur » lorsque les éléments de la surface du plateau (ou les transporteurs conducteurs) y arrivent neutres et en repartent chargés ; il est dit « capteur » lorsque ces éléments y arrivent chargés et en repartent neutres ; enfin, il est dit « capteur-déverseur » lorsque ces éléments y arrivent chargés et en repartent chargés en sens inverse.

Sur les figures 1, 2 et 3 qui schématisent les trois groupes de ma classification, les génératrices sont réduites à leur plus

simple expression et comportent le minimum d'organes, le nombre de ces organes, peignes et inducteurs, pouvant être augmenté dans les génératrices dites multipolaires, sans pour cela entraîner un changement de groupe.

**A. Premier groupe.** — Suivant le schéma général de la figure 1, un peigne tel que P est déverseur, l'autre peigne P' étant capteur.

D'après le sens de la tension excitatrice U entre le peigne déverseur P et l'armature de son inducteur I, on voit que le sens de la polarité ne se prête pas à l'auto-excitation.

Des exemples sont donnés par les machines de Bertsh (1868) et de Carré (1868) où l'on trouve, à la place de l'inducteur tel que je l'ai envisagé, soit une plaque isolante électrisée au préalable par frottement, soit un autre plateau isolant frottant en permanence un coussin.

MM. Chaumat et Lefrand ont réalisé en 1933 des machines à plusieurs paires de peignes à excitation séparée qui peuvent être classées dans ce premier groupe [6].

**B. Deuxième groupe.** — Suivant le schéma général de la figure 2, les peignes principaux tels que P et P' sont uniquement et tous deux capteurs, l'un de charges positives, l'autre de charges négatives, le plateau D étant chargé par des brosses ou des peignes auxiliaires déverseurs tels que p et p' qui sont influencés par les inducteurs I et I'.

Il s'agit en somme de la combinaison de deux machines du premier groupe sur un même plateau pour rendre possible l'auto-excitation comme dans les machines de Belli (1831), de Varley (1860), de Lord Kelvin (replenisher), de MM. Chaumat et Lefrand (1931) soit auto-excitatrice soit à excitation séparée (différente par conséquent de celle dont il est question dans le premier groupe) et de Wimshurst (1883) en considérant que, dans cette dernière, la partie chargée

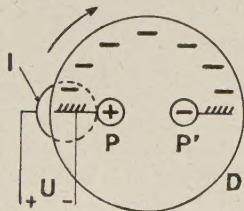


Fig. 1. — Schéma d'une machine du premier groupe : D, plateau rotatif ; P, peigne déverseur ; P', peigne capteur ; I, inducteur ; U, tension excitatrice.

de chaque plateau joue le rôle d'inducteur vis-à-vis de la brosse ou du peigne du conducteur diamétral de l'autre plateau [7].

**C. Troisième groupe.** — Suivant le schéma général de la figure 3, chaque peigne principal est capteur-déverseur.

On voit que le peigne P du pôle positif, par exemple, doit être influencé par un inducteur I positif par rapport à ce peigne.

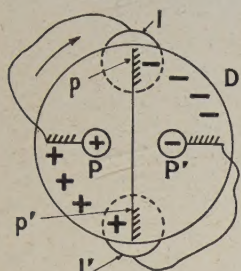


Fig. 2. — Schéma d'une machine du deuxième groupe : P, P', peignes capteurs ; p, p', peignes auxiliaires déverseurs ; I, I' inducteurs (auto-excitation).

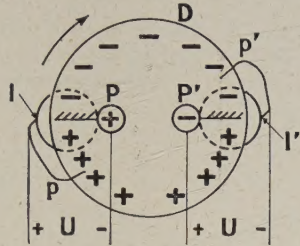


Fig. 3. — Schéma d'une machine du troisième groupe : P, P', peignes capteurs-déverseurs ; p, p' peignes auxiliaires.

L'auto-excitation est possible à l'aide de brosses auxiliaires telles que p et p' qui sont caprices et qui sont reliées aux inducteurs, mais elle est instable comme dans les machines de Holtz (1865) et de Toepler à balais auxiliaires (1866), ou dans la machine de Holtz à deux plateaux. Dans la machine de Voss la stabilité est acquise par l'adjonction d'un conducteur diamétral à deux brosses, soit en tout quatre brosses auxiliaires en plus des peignes.

Quant à l'excitation séparée, on peut la réaliser avec une génératrice auxiliaire, comme dans une machine de Toepler à plusieurs plateaux, ou bien avec deux sources auxiliaires séparées. Dans ce dernier cas, la chose est difficile parce qu'il faut laisser s'exercer et sans fuite toute la tension de la machine entre les deux sources auxiliaires, chacune devant maintenir une différence de potentiel élevée entre l'inducteur et le peigne influencé.

D'autre part, le remplacement de chaque source auxiliaire par un condensateur chargé s'avère irréalisable parce que, même en supposant évitée toute décharge intempestive, on se heurte à une décharge progressive qui nécessite vite une recharge.

En résumé, on voit que dans les deux premiers groupes de ma classification, chaque peigne ou frotteur ne fait que charger le plateau, ou bien ne fait que le décharger, sans accomplir ces deux fonctions à la fois. C'est ce que M. Félici désigne sous le nom de simple transport.

Dans le troisième groupe, chaque peigne principal accomplit ces deux fonctions à la fois suivant un processus dénommé double transport par M. Félici. Toute la partie utilisable du plateau est alors chargée, et les charges électriques de signes contraires, véhiculées par le plateau dans des sens contraires par rapport à un même peigne, correspondent à deux courants de convection en parallèle ; c'est-à-dire que, toutes choses égales d'ailleurs, le débit doit être deux fois plus élevé que dans le cas du simple transport.

En fait, le débit est généralement trois fois plus élevé par suite de la suppression presque complète des capacités parasites. Le double transport est donc intéressant.

Or, il est possible de l'assurer à l'aide du mode d'excitation

particulier que j'ai signalé dans diverses publications et qui est comparable à ce qu'est l'aimant pour les machines électromagnétiques [3], [4], [8].

Il s'agit de l'utilisation systématique de particularités constatées avec l'inducteur à armature métallique recouverte d'isolant, particularités qui se présentent d'abord comme des anomalies. En effet, dans le cas d'une machine à plateau (et aussi dans le cas d'une machine à transporteurs conducteurs), un tel inducteur n'assure pas seulement le fonctionnement normal, c'est-à-dire l'influence sur le peigne avec l'existence d'un champ dans l'entreverre (1) de sens direct par rapport au sens de la différence de potentiel entre le peigne et l'inducteur, mais il est aussi exposé aux particularités suivantes :

1° la cessation de l'influence de l'inducteur sur le peigne et le transporteur, c'est-à-dire l'annulation du champ électrique dans l'entreverre, lorsque la différence de potentiel excitatrice est portée à une valeur suffisamment élevée ;

2° la réapparition de l'influence sur le peigne, mais avec un champ inversé dans l'entreverre, lors de la diminution de la différence de potentiel excitatrice, celle-ci gardant un sens invariable à partir de la valeur précédemment atteinte, le maximum d'influence correspondant à l'égalisation des potentiels du peigne et de l'armature.

## II. Anomalies dues à l'isolant recouvrant l'inducteur.

Le premier travail en rapport avec des anomalies de ce genre date de 1903, c'est celui de Crémieu et Pender expliquant l'insuccès des essais entrepris par Crémieu au sujet de la confirmation de la loi de Rowland [9].

Malcles a reproduit des phénomènes analogues dans des conditions plus simples [10] et P. Langevin a, le premier, attiré l'attention sur le rôle primordial qu'il fallait en cela attribuer à l'air ionisé. C'est sur cette base du rôle joué par l'ionisation de l'air que je me propose, dans ce travail, d'expliquer le fonctionnement d'une nouvelle génératrice. Cette même base m'a d'ailleurs déjà servi au sujet des oscillations périodiques de la polarité de certaines machines auto-excitatrices [5] et notamment celle de MM. Chaumat et

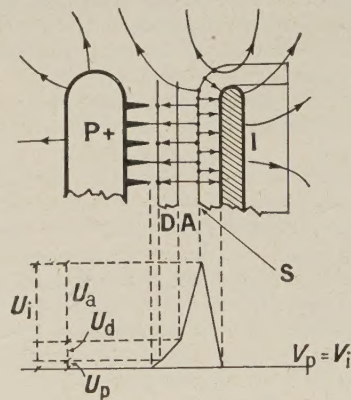


Fig. 4. — Coupe de l'inducteur positif. Répartition des potentiels : I, armature conductrice ; S, surface de l'isolant ; D, plateau rotatif ; P, peigne positif au potentiel de I.

Lefrand (fig. 2), ainsi que pour expliquer le comportement d'autres machines que j'ai imaginées.

Dans ces machines, j'ai le premier utilisé la propriété que possède l'inducteur à armature recouverte d'isolant de pouvoir influencer le peigne et le transporteur lorsque le poten-

(1) L'entreverre est l'espace compris entre inducteur et plateau.

tiel de l'armature est ramené au potentiel du peigne, comme cela se produit dans la seconde particularité. Là où le fonctionnement classique de l'inducteur exigeait le maintien d'une différence de potentiel, le nouveau fonctionnement repose sur l'égalisation de ces potentiels. Autrement dit, la source auxiliaire peut être remplacée par une simple connexion et c'est la simplicité du procédé ainsi employé qui constitue le point intéressant de ces nouvelles machines. Ce procédé, applicable à une machine d'un groupe quelconque est tout désigné pour les machines du troisième groupe.

Cette propriété de l'inducteur s'explique par la présence de charges électriques excitatrices sur la surface externe  $S$  de l'isolant qui recouvre l'armature  $I$  mise au potentiel du peigne, selon la figure 4. La répartition des potentiels indiquée sur le graphique de cette figure montre que le champ s'inverse de part et d'autre de ces charges lorsqu'on franchit la surface  $S$ , la différence de potentiel  $U_i$  entre les deux faces de l'isolant inducteur étant égale et de signe contraire à la somme  $U_a + U_d + U_p$  respectivement : dans la couche d'air, dans le plateau et dans l'intervalle compris entre la face du plateau et les pointes du peigne. Autrement dit, le diélectrique inducteur joue le rôle du condensateur chargé dont il a été question précédemment, mais ce condensateur se trouve extrêmement simplifié car il a une seule armature qui est celle de l'inducteur, l'autre armature n'existant pas sur la surface nue de l'isolant. C'est grâce à cette simplicité qu'un tel condensateur peut être soustrait aux décharges accidentelles tout en restant encore exposé à l'inconvénient d'une décharge progressive plus ou moins lente qui, ainsi que nous le verrons, dépend des conditions d'utilisation. C'est pourquoi il importe de compléter au bout d'un certain temps de fonctionnement la charge excitatrice, de même qu'on effectue la recharge d'un condensateur.

Or, cette recharge peut s'opérer facilement sur la machine elle-même, en cours de fonctionnement, en produisant entre l'armature de tout inducteur et le peigne en regard une différence de potentiel suffisamment élevée pour ioniser l'air de l'entreverre, suivant une répétition systématique de la même cause qui détermine les particularités précitées.

L'obtention de ce résultat est évidemment incompatible avec la persistance de la connexion conductrice entre le peigne et l'armature, connexion qui procure le fonctionnement particulier de ces inducteurs. C'est ainsi que j'ai été conduit à recourir à des changements de connexions dont la figure 5 montre deux exemples choisis parmi les combinaisons que j'ai réalisées.

Suivant le premier exemple (fig. 5 a), chaque inducteur tel que  $I$  porte un bras conducteur dont une extrémité pivote sur l'armature. Lorsque l'autre extrémité du bras touche le peigne  $P$  en regard de l'inducteur, la connexion de marche est réalisée, ou plutôt les connexions (en trait plein), le bras du second inducteur  $I'$  devant être manœuvré synchroniquement. En supposant les inducteurs déjà porteurs de charges grâce à un artifice assurant l'amorçage, la machine fonctionnera, de sorte que les condensateurs  $C$ ,  $C'$  connectés aux peignes seront chargés par la machine. Si à ce moment on fait pivoter simultanément les deux bras jusqu'à les faire toucher l'un avec l'autre suivant les connexions d'arrêt indiquées par le trait ponctué, la machine cessera bien de fonctionner, puisque les armatures des inducteurs ne communiquent plus avec les peignes, mais la tension momentanément maintenue par les condensateurs crée une différence de potentiel (égale à la moitié de la tension) entre le peigne  $P$  et l'armature de l'inducteur  $I$  et une différence de potentiel de même valeur que la première entre  $P'$  et  $I'$ . Si la tension est suffisamment élevée pour déclencher l'ionisation de l'air

dans les entreverres, on voit, en supposant  $P$  positif, que la face externe de l'isolant de l'inducteur  $I$  va recevoir des charges positives, tandis que la face du plateau en regard

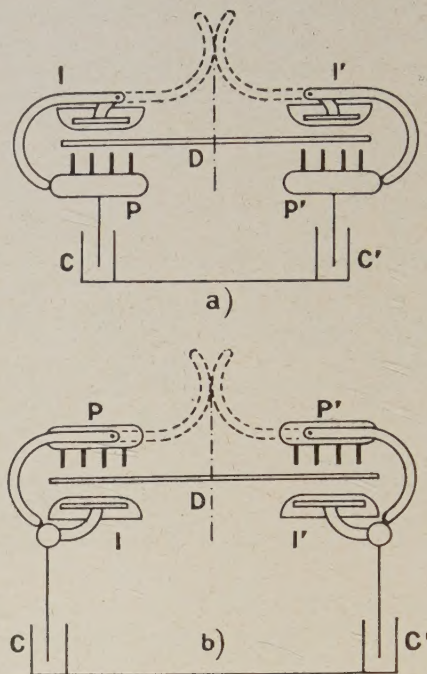


Fig. 5. — Exemples de génératrice à changement de connexions : a) cas d'une polarité invariable. Les bras conducteurs pivotent sur  $I$  et  $I'$ .  $C$  et  $C'$  condensateurs entre  $P$  et  $P'$ ; b) cas d'une polarité changeante. Les bras conducteurs pivotent sur  $P$  et  $P'$ .  $C$  et  $C'$  condensateurs entre  $I$  et  $I'$ .

va recevoir des charges négatives parasites (c'est-à-dire non disposées sur la face peignée du plateau), qui vont être emportées. Quant à l'inducteur  $I'$  la surface de son isolant va recevoir des charges négatives.

Les inducteurs ainsi chargés exerceront ensuite leur influence lors du retour aux connexions de marche, à condition que les charges qu'ils portent ne soient pas neutralisées ni à ce moment ni après un temps insuffisant de fonctionnement.

Nous verrons plus loin, d'une part, comment est évitée la neutralisation immédiate à laquelle on est exposé et, d'autre part, les possibilités permises avec une machine réalisée en ce qui concerne la constance du courant entre deux rechargements des inducteurs.

D'après les signes des charges, dans le cas a), on voit que ces rechargements assurent une polarité invariable, qui dépend de l'amorçage initial, quel que soit le sens de rotation.

Il n'en est plus de même dans le cas b), où les bras mobiles pivotent sur les peignes tandis que les condensateurs sont connectés en permanence aux inducteurs. Dans ce dernier montage, chaque rechargement se fait en sens inverse par rapport au précédent, de sorte que la polarité de la génératrice s'inverse régulièrement à chaque manœuvre, quel que soit le sens de rotation.

Par suite de l'intérêt certain que présente, pour assurer facilement le double transport, le nouveau mode d'excitation, on est amené à se demander s'il est possible de le conserver tout en supprimant les changements de connexions, dans le but d'accroître encore la simplicité de la génératrice.

Il est évident que la suppression complète de l'évasion

des charges excitatrices pendant le fonctionnement constituerait une solution élégante. Mais, laissant cette étude de côté, j'ai poursuivi mes travaux dans le but de rechercher et d'ex-

périmenter une disposition susceptible d'assurer, sans changement de connexions, le rechargement intermittent des inducteurs à couche isolante.

## DEUXIÈME PARTIE : Procédé assurant sans changement de connexions le rechargement par ionisation des inducteurs d'une génératrice à double transport

**I. Introduction.** — Étant donnés deux peignes et deux inducteurs à couche isolante, organes qui équiperont un plateau isolant rotatif et dont l'ensemble doit constituer une génératrice à influence, il s'agit d'obtenir, d'une part, l'égalisation des potentiels du peigne et de l'armature de l'inducteur en regard pour assurer le fonctionnement et, d'autre part, de brèves et hautes différences de potentiel entre ces mêmes organes pour assurer le rechargement intermittent des inducteurs, tout ceci sans déplacement de connexions.

Dans ce dessein, l'armature de chaque inducteur est reliée en permanence au peigne en regard par une résistance qui doit, d'une part, égaliser aussi complètement que possible les potentiels de l'armature et du peigne tout en permettant, d'autre part, la production de brèves et hautes dénivellations de potentiel entre ces organes.

Pour provoquer de telles dénivellations de potentiel, j'ai eu recours aux décharges disruptives produites à un éclateur alimenté par la génératrice elle-même [11].

L'effet attendu est l'ionisation passagère de la couche d'air comprise entre l'inducteur et le plateau, ionisation qui doit à son tour assurer l'accumulation de charges électriques d'un certain signe sur la surface externe de l'isolant inducteur.

**II. Fonctionnement : analyse préliminaire.** — La première idée qui vient à l'esprit est de relier directement le circuit extérieur et l'éclateur aux peignes, de façon que le courant débité par ceux-ci ne passe pas par les résistances, suivant le schéma (B) de la figure 6.

Sur ce schéma, où D représente le plateau isolant rotatif,

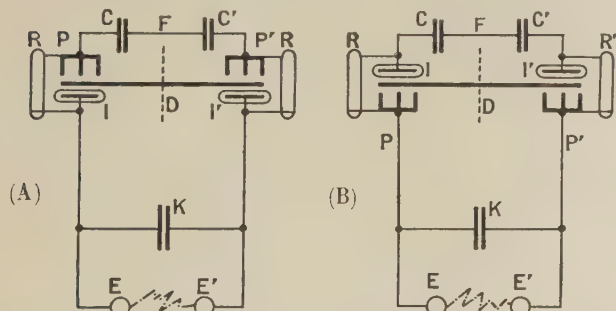


Fig. 6. — Schémas d'une génératrice électrostatique : (A), cas d'une polarité invariable ; (B), cas d'une polarité changeante ; D, plateau rotatif ; P, P', peignes ; I, I', inducteurs ; R, R', résistances permanentes ; C, C' et K, condensateurs ; E, E', éclateur. Le circuit extérieur est en général relié à l'éclateur, mais il peut être relié aux peignes dans le schéma (A) ou aux inducteurs dans le schéma (B).

des résistances identiques R et R' relient respectivement et en permanence, d'une part, le peigne P à l'inducteur I et, d'autre part, le peigne P' à l'inducteur I', de sorte que ces résistances sont le siège de chutes de tensions élevées lorsque, par suite de la décharge disruptive, la tension s'annule brusquement

aux bornes de l'éclateur E E' dont la capacité propre peut, à volonté être augmentée par un condensateur K. Ces chutes de tension sont encore plus sûrement obtenues si l'on prend soin d'augmenter la capacité propre de l'inducteur I par rapport à l'inducteur I' grâce à l'adjonction entre ces organes de deux condensateurs tels que C et C'.

Le courant débité par les peignes dans le circuit externe ne passant pas par les résistances R et R', on a la possibilité de réaliser la condition de fonctionnement (égalité des potentiels de l'armature et du peigne en regard) quelles que soient les valeurs de R et R', tant que les potentiels des parties de la machine sont invariables. Par conséquent, on est libre de choisir pour R et R' une valeur aussi élevée que l'exige la production de grandes chutes de tension dans ces résistances, par onde de choc, lors de la décharge disruptive à l'éclateur. Si ces chutes de tension sont suffisantes, elles entraîneront l'ionisation passagère de l'air de l'entreverre en face de chaque peigne. Cette ionisation va accumuler sur l'isolant inducteur des charges dont le signe est facile à déterminer en se reportant au schéma (B) de la figure 6.

Avant la décharge, supposons E positif ; le plateau D transporte des charges positives de P' vers P et des charges négatives de P vers P', ceci grâce à l'influence des charges excitatrices positives sur la face externe de l'isolant de l'inducteur I (et de charges négatives sur l'isolant de I').

Au moment de la décharge, l'armature de I devient positive par rapport au peigne P, puisque la tension tend à subsister entre les inducteurs I et I' tant que les condensateurs C, C' ne se seront pas complètement déchargés, tandis que la tension est annulée entre P et P'.

Si l'air est ionisé dans l'entreverre, des charges négatives vont se joindre sur l'isolant de l'inducteur I, y neutraliser les charges positives précédentes et s'y accumuler ensuite, à condition que l'ionisation soit assez intense.

Après la décharge, l'isolant de l'inducteur I sera chargé négativement hors du cas où il serait simplement neutralisé. En conséquence, ces charges excitatrices négatives vont, par le jeu de leur influence sur le peigne P, rendre celui-ci déverser de charges positives sur les éléments de la surface du plateau qui passent devant lui et qui s'éloignent en franchissant des régions où le potentiel s'élève de plus en plus jusqu'à l'autre peigne. Ces charges véhiculées ont bien une influence réciproque sur l'inducteur, l'effet produit étant analogue à la réaction d'induit dans les dynamos, dont il sera question plus loin sous le nom de réaction de tension, mais l'inducteur conserve la plus grande partie de son efficacité du fait que son armature, qui joue le rôle d'écran électrostatique, se trouve maintenue au potentiel du peigne par la résistance R, quelle que soit la tension fournie par la génératrice, du moins tant qu'aucune dérivation de courant n'existe entre les deux inducteurs.

Puisque E doit être rendu négatif, la polarité de la génératrice ne doit pas être la même avant et après la décharge. Le schéma (B) de la figure 6 est donc celui d'une génératrice dont

la polarité doit s'inverser sous l'effet de chaque décharge à l'éclateur, hors du cas possible de désamorçage.

L'analogie est évidente avec le schéma (b) de la figure 5 de la génératrice à bras pivotants. Pour l'un comme pour l'autre schéma, la tension est maintenue entre les inducteurs par les condensateurs C, C', tandis qu'elle est annulée entre les peignes soit par décharge, soit par le contact des bras pivotants.

Pour que l'effet de la décharge soit compatible avec une polarité invariable, il importe d'utiliser un autre schéma.

Dans le schéma (A) de la figure 6, les capacités C, C' sont insérées entre les peignes, tandis que ce sont les inducteurs I et I' qui sont reliés à l'éclateur EE'. Dans ces conditions, pour une polarité initiale attribuée à EE', il est clair qu'au moment de la décharge à l'éclateur, la chute de tension transitoire dans la résistance R par exemple, sera, par rapport aux organes P et I, inverse de celle produite avec le schéma (B). On en conclut que l'ionisation consécutive accumulera sur l'isolant inducteur de la génératrice du schéma (A) des charges dont le signe sera le même que celui des charges excitatrices qui s'y trouvaient avant la décharge, condition qui correspond bien avec la persistance de la polarité initiale. Un parallèle s'établit avec le schéma de la page 5a.

Mais, avec le schéma (A), la condition fondamentale n'est plus réalisée : l'armature de l'inducteur n'est plus au potentiel du peigne à cause de la chute de tension permanente produite dans la résistance R par le passage du courant fourni par la génératrice à l'éclateur auquel est généralement relié le circuit d'utilisation.

Supposons P positif ; le courant, d'après le sens conventionnel, va de P vers I à travers R. D'où l'infériorité du potentiel de l'armature de I par rapport à celui du peigne P, état qui tend à défavoriser l'action des charges excitatrices de l'isolant inducteur.

Ainsi, comme il fallait s'y attendre, les chutes de tension persistantes dans les résistances ont un sens tel qu'elles tendent à affaiblir l'excitation. Le bon fonctionnement exige que ces chutes, qui vont être évaluées, soient faibles devant la différence de potentiel créée entre les deux faces de l'isolant inducteur, considération qui imposera une limite supérieure pour R et R' (voir figure 4).

Pour connaître l'ordre de grandeur de cette différence de potentiel  $U_1$ , il convient de remarquer qu'elle est égale à celle qui existe entre la face externe de l'isolant inducteur et le peigne, lorsque celui-ci est directement relié à l'armature. Par suite de l'existence d'un champ, entre la surface peignée du plateau et les pointes du peigne (appelé plus loin champ de transfert), cette valeur commune est un peu supérieure à la différence de potentiel entre la face externe de l'isolant inducteur et la face peignée du plateau. Or, cette dernière différence de potentiel peut être approximativement évaluée de la façon suivante :

Soit un entreverre normal de 0,5 mm. Sous cette épaisseur la couche d'air à la pression atmosphérique peut supporter un champ de 50 kV : cm <sup>(1)</sup>, auquel correspond un autre champ voisin de 16 kV : cm dans le plateau (constantes diélectriques : ébonite 2,3 ; plexiglass 3,6). Si ce dernier a une épaisseur de 2 mm (pour un diamètre de 25 cm, par exemple), la différence de potentiel cherchée est

$$50\,000 \times 0,05 + 16\,000 \times 0,2 = 2\,500 + 3\,200 = 5\,700 \text{ V.}$$

Or, une chute de tension inférieure au centième, soit une cinquantaine de volts dans R (comme dans R'), sera négligeable

ce qui correspond à  $R = 1 \text{ M}\Omega$  pour un courant de 50  $\mu\text{A}$ , courant d'une génératrice bipolaire à plateau de 25 cm de diamètre.

Il convient même de remarquer que le fonctionnement doit s'accommoder de chutes de tension dépassant le centième en question, de sorte que la valeur de  $1 \text{ M}\Omega$  ne doit pas constituer une limite infranchissable. Remarquons de plus que ce raisonnement suppose le circuit d'utilisation connecté à l'éclateur. Il pourrait en être autrement : tout en laissant l'éclateur connecté tel qu'il l'est aux armatures des inducteurs du schéma (A), il serait possible de connecter directement aux peignes le circuit d'utilisation dont le courant ne passerait pas par R et R', ce qui réduirait avantageusement les chutes de tension dans ces résistances.

Connaissant le plafond de R, il faut maintenant chercher l'ordre de grandeur de la limite inférieure de R à partir de laquelle la décharge à l'éclateur ne produit plus l'ionisation de l'entreverre.

Cet ordre de grandeur est utile à connaître a priori, car si la marge était trop faible par rapport, à la limite supérieure, le problème risquerait de ne pas pouvoir être résolu. C'est ici qu'interviennent les condensateurs et les capacités entre certains organes de la machine.

La capacité entre le peigne et l'armature de l'inducteur à travers le plateau, l'air non ionisé de l'entreverre et le diélectrique inducteur, est difficilement définissable en raison des charges émises par le peigne mais, cette réserve faite, désignons par M la valeur approximative de cette capacité.

Pour chaque pôle, le problème est ramené au cas de deux condensateurs M et C disposés suivant la figure 7, le condensateur M étant shunté par la résistance R, les points P et I correspondant respectivement au peigne et à l'armature du schéma (A) de la figure 6.

Si U est la tension de la génératrice, la moitié de cette tension s'exerce entre le point E correspondant à la sphère de l'éclateur et le point F correspondant à la jonction entre C et C'.

Le condensateur C acquiert une charge Q. La chute de tension permanente dans R étant tout à fait négligeable devant  $U/2$ , lorsque les potentiels sont constants, on a  $Q = CU/2$

Pendant la décharge à l'éclateur, décharge qui équivaut à

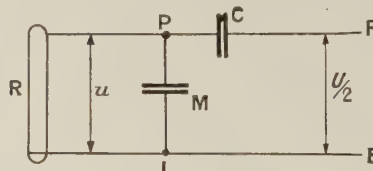


Fig. 7. — Schéma dans lequel le condensateur M représente la capacité entre inducteur et peigne ;  $U/2$ , tension à l'éclateur à considérer pour ce schéma.

une annulation rapide de la différence de potentiel entre E et F, le condensateur C se décharge dans la capacité M shuntée par R, de sorte qu'entre les armatures de M, c'est-à-dire entre les points P et I, s'exerce une tension  $u$  variable en fonction du temps  $\theta$ .

Dans le cas où la décharge à l'éclateur n'est pas perturbée par les organes de la génératrice et s'effectue suivant la loi exponentielle de constante de temps  $t$  (en valeur absolue), on trouve <sup>(1)</sup>

$$u = \frac{U}{2} \cdot \frac{T'}{T - t} \left[ e^{-\frac{\theta}{T}} - e^{-\frac{\theta}{t}} \right].$$

<sup>(1)</sup> Voir appendice.

<sup>(1)</sup> Ce champ doit être inférieur au champ critique Y calculable à partir de la mesure de la force critique, en l'occurrence  $1,5 \text{ g : cm}^2$

$Y = 300 \sqrt{8 \pi} \times 980 \times 1,5 = 57\,500 \text{ V : cm}$  (à Alger) [12].

Dans cette formule,  $T = R(M + C)$  et  $T' = RC$ .

La différence entre les exponentielles passe par un maximum qui est inférieur à 1, mais qui tend vers 1 si l'une des constantes de temps devient très grande par rapport à l'autre, de sorte que :

si  $T < t$ , le coefficient de  $U/2$  tend vers  $T'/t$ , faible fraction, d'où découle la petitesse du maximum de  $u$  ;

si  $T = t$ , il faut lever l'indétermination de forme  $0/0$ , et

$$u = \frac{U}{2} \cdot \frac{T'}{T} \cdot \frac{0}{T} \cdot e^{-\frac{0}{T}}$$

passe par le maximum

$$\frac{U}{2} \cdot \frac{T'}{T} \cdot \frac{1}{e} ;$$

si  $T > t$ , le coefficient de  $U/2$  tend vers  $T'/T = C/(C + M)$ , fraction qui tend vers 1 si  $C$  est grand par rapport à  $M$ , de sorte que dans ce cas le maximum de  $u$  approche d'autant plus de  $U/2$  que  $T$  est, d'autre part, d'autant plus grand par rapport à  $t$ .

Pour avoir la plus forte chute de tension possible avec un  $U$  donné, on a donc avantage à ce que  $T$  soit grand par rapport à la constante de temps  $t$  de l'éclateur.

Comme  $t = K\rho$ , produit de la capacité  $K$  shuntant l'éclateur par la résistance  $\rho$  de l'étincelle (si l'on néglige tout circuit inductif), il faut que

$$R(M + C) > K\rho$$

ou

$$R > \frac{K}{M + C} \rho.$$

On peut aisément choisir pour  $K$  un ordre de grandeur voisin de celui de  $C$  résultant de la construction. (Ainsi la génératrice décrite en dernière partie a été essayée avec  $K = 40$  unités électrostatiques C.G.S. et  $C = 9$  unités électrostatiques C.G.S.)

Considérons néanmoins  $K/C$  voisin de 100, ou même le cas encore plus défavorable ou  $K/(M + C) = 100$ . La résistance de l'étincelle, tout en dépendant de  $K$  entre autres facteurs, est de l'ordre de grandeur de l'ohm, tout au plus d'une dizaine d'ohms. Par conséquent,  $R$  doit être supérieur à

$$100 \times 10 = 1\,000\,\Omega.$$

En résumé, pour l'exemple choisi d'une génératrice à plateau de 25 cm de diamètre, montée suivant le schéma (A) (Fig. 6), les considérations précédentes font prévoir que :

1°  $R$  doit être inférieur ou voisin de 1 M $\Omega$ , pour maintenir entre ses extrémités une faible différence de potentiel lors du fonctionnement ;

2°  $R$  doit être bien supérieur à 1 000  $\Omega$  pour être le siège de différences de potentiel élevées lors de l'étincelle.

Vu l'important écart entre ces limites, le problème apparaît non seulement soluble, mais il laisse prévoir une grande marge pour un choix arbitraire de  $R$ . Ce choix étant fait, le maximum de  $u$  approche de  $U/2$ , d'après ce qui a été dit. Pour que l'étincelle puisse provoquer l'ionisation dans l'entreverre, il faut donc, d'autre part, que  $U/2 > u_0$ ,  $u_0$  désignant la tension qui, appliquée entre le peigne  $P$  et l'armature  $I$ , commencerait à provoquer l'ionisation dans l'entreverre, compte tenu de la pression, de l'épaisseur et de la température de cette couche d'air et des épaisseurs des diélectriques.

**III. Fonctionnement : théorie développée.** — Dès que l'ionisation se produit, la tension  $u$  entre le peigne et l'armature cesse de vérifier la formule précédente à double exponentielle. Pour suivre alors les rapides déplacements

de charges dont la succession aboutit au rechargement de l'inducteur puis à son influence, j'ai étendu la notion de capacité à des diélectriques sans armatures. Certes, dans le cas général, cette extension serait dépourvue de sens puisque la répartition des charges sur les surfaces isolantes serait indéterminée indépendamment des formes et n'en ferait plus des surfaces équipotentiellles. Mais, dans le cas particulier où le peigne et l'armature de l'inducteur imposent à travers les régions, assez restreintes, des surfaces et des feuilles isolantes parallèles que sont le plateau et le diélectrique inducteur ainsi que l'air de l'entreverre, une répartition des lignes de force ou des charges qui peut être considérée comme suffisamment uniforme sur chacune desdites régions, on peut définir le rapport entre la charge de chaque région sensiblement équipotentielle et la différence de potentiel par rapport à la surface en regard. La répartition effective des lignes de force permettrait ainsi de calculer les capacités élémentaires  $D$ ,  $A$ ,  $I$ , localisées en face du peigne, concernant respectivement le plateau, l'entreverre, l'inducteur et telles que

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{A} + \frac{1}{I} = \frac{1}{M},$$

$M$  étant la capacité définie au paragraphe II (p. 10).

Supposons la machine non amorcée :  $D$ ,  $A$ ,  $I$  sont neutres ; seul,  $C$  possède une charge  $Q = CU/2$ , grâce à la tension  $U$  fournie par une source auxiliaire.

**A. Amorçage par étincelle. Première étincelle à l'éclateur.** — La constante de temps  $T = R(M + C)$  devant être grande par rapport à celle  $t$  de l'éclateur, ainsi que nous

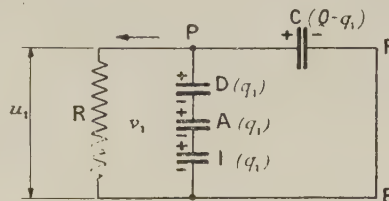


Fig. 8. — Schéma relatif à la première étincelle, A non ionisé. Décharge partielle de  $C$  dans l'ensemble  $D$ ,  $A$ ,  $I$ .

l'avons vu, il s'ensuit que la consommation de  $R$  est négligeable pendant la durée effective de l'étincelle.

Le schéma de la figure 8 se rapporte au cas où l'air de l'entreverre  $A$  ne s'ionise pas. L'étincelle produit l'effet d'un court-circuit quasi instantané en  $EF$  qui décharge partiellement  $C$  dans l'ensemble  $D$ ,  $A$ ,  $I$ . Chacune de ces trois capacités élémentaires prend la charge  $q_1$

$$q_1 = \frac{Q}{C \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{M} \right)} = \frac{U}{2 \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{M} \right)}.$$

La tension  $v_1$  en  $A$  est

$$v_1 = \frac{q_1}{A} = \frac{U}{2A \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{M} \right)} < v_0.$$

Lorsque  $v_1$  atteint  $v_0$ , maximum que puisse supporter l'entreverre  $A$ , la tension  $u$  aux extrémités de  $R$  atteint la valeur  $u_0$  dont il a été question précédemment. Entre  $v_0$ ,  $u_0$  et la tension disruptive correspondante  $U_0$ , on a les relations

$$\frac{u_0}{v_0} = \frac{A}{M}; \quad v_0 = \frac{U_0}{2A \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{M} \right)}.$$

Le schéma de la figure 9 correspond au cas où  $U > U_0$ .

Dans ce cas, l'ionisation de l'air équivaut à un court-circuit momentané de A ( $v = 0$ ), de sorte que C se décharge partiellement dans les deux condensateurs D et I en série qui prennent une charge

$$q_2 = \frac{Q}{C \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right)} = \frac{U}{2 \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right)}$$

Après quoi, l'ionisation s'étant éteinte, A redevient isolant

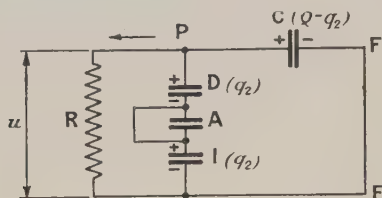


Fig. 9. — Schéma relatif à la première étincelle. A ionisé. Décharge partielle de C dans l'ensemble D, I comme si le condensateur A était en court-circuit.

et se recharge, mais en sens inverse, par suite de la diminution progressive de la différence de potentiel entre les extrémités de R. Lorsque cette différence de potentiel est annulée, deux cas sont à considérer suivant que le plateau est immobile ou tourne rapidement.

Le schéma de la figure 10 concerne le cas où le plateau est immobile. La charge de D n'ayant pas été emportée par suite de l'immobilité du plateau, l'ensemble D et I cède à A, la charge

$$q_3 = q_2 M \left( \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right) = \frac{UM \left( \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right)}{2 \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right)}$$

La tension en A est

$$v_3 = \frac{q_3}{A}$$

Le schéma de la figure 11 correspond au cas où le plateau tourne assez vite pour que toutes les charges déposées sur le plateau suivant la figure 10 aient été emportées lorsque la différence de potentiel est considérée comme nulle entre les extrémités de R, de sorte que c'est I seul qui cède à A et à D la charge

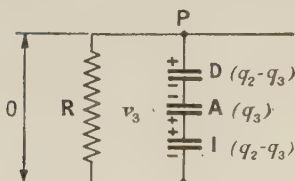


Fig. 10. — Schéma relatif à la fin de la première étincelle. Plateau immobile. L'inducteur I et le plateau D se déchargent partiellement dans le condensateur A.

$$q_4 = \frac{M}{I} q_2 = \frac{MU}{2I \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right)}$$

La tension en A est

$$v_4 = \frac{q_4}{A}$$

L'importance du rôle joué par cette tension  $v_4$ , tient à ce qu'elle détermine le champ excitateur dans l'entreverre A en face du peigne pendant la rotation du plateau. Or, ce champ peut être comparé à sa valeur critique qui correspond à la tension limite  $v_0$  en A, grâce à la connaissance du rapport  $v_4/v_0$  en admettant qu'en cette région le champ reste proportionnel à  $v$ . En posant

$$\alpha = \frac{M \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{M} \right)}{I \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right)} = \frac{\frac{1}{I} \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{D} + \frac{1}{A} + \frac{1}{I} \right)}{\left( \frac{1}{D} + \frac{1}{A} + \frac{1}{I} \right) \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right)}$$

Il vient

$$\frac{v_4}{v_0} = \alpha \frac{U}{U_0}$$

Et on trouve aisément que

$$\alpha < 1; \quad \frac{\partial \alpha}{\partial C} > 0; \quad \frac{\partial \alpha}{\partial D} > 0; \quad \frac{\partial \alpha}{\partial A} > 0; \quad \frac{\partial \alpha}{\partial I} < 0.$$

Il en résulte :

1° si l'ionisation dans l'entreverre est produite de justesse par une première étincelle déclenchée sous une tension  $U$  légèrement supérieure à  $U_0$ , le champ dans l'entreverre pendant la marche de la génératrice sera notablement inférieur à sa valeur critique, puisque  $U/U_0$  étant égal à 1,  $v_4 = \alpha v_0$ ;

2° Pour que la première étincelle émise pendant la marche charge à fond l'inducteur, c'est-à-dire procure d'emblée le champ maximum dans l'entreverre,  $v_4/v_0$  doit être voisin de 1; il faut donc que la tension disruptive  $U$  soit voisine de  $U_0/\alpha$ . C'est-à-dire que dans ce cas la tension  $U$  doit être notablement supérieure à  $U_0$ . De ce point de vue, il est intéressant de passer en revue les modifications d'organes qui peuvent être faites en vue d'adopter la plus basse tension  $U$ .

L'augmentation de  $C$ , offre le double avantage de diminuer  $U_0$  tout en augmentant  $\alpha$ . Lorsque  $C$  devient très grand devant les capacités élémentaires,  $\alpha$  tend vers la limite

$$\frac{1}{1 + \frac{I}{D}}$$

L'augmentation de  $D$ , consécutive à l'amincissement du plateau ou à une plus grande valeur de sa constante diélectrique, offre le double avantage d'augmenter  $\alpha$  tout en diminuant  $U_0$ .

L'augmentation de  $A$ , consécutive au rapprochement de l'inducteur par rapport au plateau, a le double avantage d'augmenter  $\alpha$  tout en diminuant  $U_0$  et d'autant mieux que  $v_0$  est lui-même diminué.

Par contre, s'il est vrai que  $\alpha$  augmente en diminuant  $I$ ,

il faut tenir compte de ce que  $U_0$  augmente alors. En faisant entrer en ligne de compte la constante diélectrique et l'épaisseur de l'isolant inducteur, on voit que la diminution de  $I$  est à éviter.

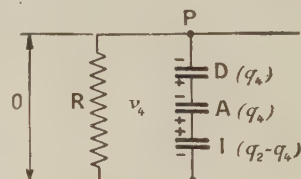


Fig. 11. — Schéma relatif à la fin de la première étincelle. Le plateau en rotation I se décharge partiellement dans l'ensemble D et A.

B. Rôle du mouvement du plateau pendant l'étincelle. —

Les considérations précédentes ont été développées en supposant que la première étincelle en provenance d'une source auxiliaire jaillissait alors que le plateau était en rotation rapide suivant le schéma de la figure 11. Mais cette première étincelle peut jaillir quand le plateau est arrêté. Pour rechercher les conséquences de cette immobilité, considérons le rapport

$$\frac{v_3}{v_4} = \frac{q_3}{q_4} = \frac{q_2 M \left( \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right) I}{q_2 M} = 1 + \frac{I}{D}$$

qui est supérieur à 1 et qui est voisin de 2. Si  $U$  est suffisamment élevé pour que  $v_4$  puisse être voisin de  $v_0$  lorsque le plateau tournera, il s'ensuit que la valeur de  $v_3$  pendant l'immobilité du plateau devrait être supérieur à  $v_0$ . Comme  $v_0$  est le maximum de tension que peut supporter A, il se produit

nécessairement une ionisation secondaire en A lorsque la différence de potentiel aux extrémités de R s'annule aussitôt après l'étincelle, le plateau étant encore immobile. Cette ionisation secondaire correspond à une neutralisation au moins partielle de la charge de I.

Par conséquent, lors de la mise en marche du plateau, la charge de I sera inférieure à celle qui correspondrait au champ maximum possible dans A.

Par contre, si l'on veut éviter l'ionisation secondaire pour avoir  $V_3 = V_0$  le plateau étant arrêté, en choisissant une valeur de  $U$  environ 2 fois plus faible que précédemment, on trouvera pour la valeur de  $v_4$  pendant la rotation, une valeur environ 2 fois plus faible que  $v_0$ . De toute façon, on prévoit ainsi que l'immobilité du plateau doit défavoriser l'amorçage par étincelle quoiqu'une remarque s'impose : suivant une loi exponentielle de constante de temps voisine de  $RC$ , la tension  $u$  entre les extrémités de R doit être réduite par exemple au dixième de sa valeur au bout du temps égal à  $2,3 RC$ , soit

$$2,3 \times 10^6 \times \frac{10}{9 \times 10^{11}} \text{ ou environ } 2,5 \times 10^{-5} \text{ s}$$

en associant une valeur de  $R$  égale à 1 MΩ à une valeur de  $C$  de 10 unités électrostatiques C.G.S.

Pendant ce temps, le déplacement périphérique d'un plateau de 250 mm de diamètre tournant à 3 000 t : mn, soit 50 t : s, sera

$$\pi \times 250 \times 50 \times 2,5 \times 10^{-5}$$

soit un peu moins de 1 mm, déplacement qui semble bien faible pour jouer un rôle.

**C. Cas de plusieurs étincelles.** — Après la première étincelle amorcée sous la tension  $U$  pendant la rotation du plateau, les condensateurs élémentaires D et A ont la même charge  $q_4$  et I porte la charge  $(q_2 - q_4)$ , selon le schéma de la figure 11. Si la tension remonte grâce au fonctionnement propre de la machine ou grâce à la source auxiliaire, le condensateur C a repris une charge  $Q = CU/2$  au moment où une nouvelle étincelle éclate à la tension  $U$ .

**D. Effet de la deuxième étincelle.** — La deuxième étincelle renouvelle l'effet équivalent à un brusque court-circuit en EF et le condensateur C se décharge de  $q'$  dans l'ensemble D, A, I, suivant le schéma de la figure 12 ou le schéma équivalent de la figure 12 bis (où les polarités sont toutes comptées dans le même sens). Tant que A n'est pas ionisé de nouveau, on a

$$\frac{Q - q'}{C} = \frac{q' - q_4}{D} + \frac{q' - q_4}{A} + \frac{q_2 - q_4 + q'}{I},$$

d'où

$$q' = \frac{\frac{Q}{C} - \frac{q_2}{I} + \frac{q_4}{D} + \frac{q_4}{A} + \frac{q_4}{I}}{\frac{1}{C} + \frac{1}{M}}.$$

La nouvelle charge de A devient, avant l'abaissement de la différence de potentiel aux extrémités de R

$$q' - q_4 = \frac{\frac{Q}{C} - \frac{q_2}{I} - \frac{q_4}{C}}{\frac{1}{C} + \frac{1}{M}},$$

On voit qu'elle est inférieure à la charge  $q_1$ , calculée lors de la première étincelle (voir Deuxième partie, III A), pour une même charge  $Q$ , c'est-à-dire pour la même tension  $U$ . Cela signifie que la tension en A sera maintenant plus faible

et que l'ionisation ne se produira pas forcément à la seconde étincelle lorsqu'elle s'est produite à la première.

Le schéma de la figure 13 et son équivalent (fig. 13 bis où les

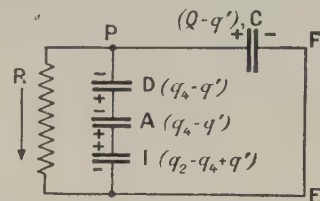


Fig. 12. — Schéma relatif à la deuxième étincelle ; A est non ionisé.

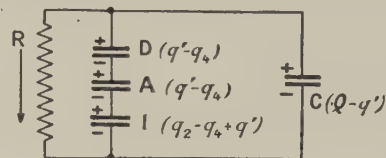


Fig. 12 bis. — Schéma relatif à la deuxième étincelle ; A est non ionisé.

polarités sont toutes comptées dans le même sens), se rapportent au cas où la tension  $U$  est suffisamment élevée pour déclencher en A l'ionisation à la deuxième étincelle. Il est alors évident que cette ionisation va augmenter la charge de I. D'ailleurs, on le démontre facilement en évaluant d'abord  $q''$ , charge cédée par C, d'après l'équation

$$\frac{Q - q''}{C} = \frac{q'' - q_4}{D} + \frac{q_2 - q_4 + q''}{I},$$

pour prouver ensuite que  $q'' - q$ , accroissement de la charge de I, est bien positif. Dès lors, il est inutile de calculer la tension qui siégera en A lors de l'égalisation des potentiels aux extrémités de R. On peut être certain que cette tension, dépendant de la charge de I, sera supérieure à ce qu'elle était après la première étincelle. En résumé, la deuxième étincelle fait augmenter le champ exciteur, pourvu que cette étincelle produise encore l'ionisation dans l'entreverre et en excluant bien entendu le cas où ce champ atteint d'emblée sa valeur critique dès la première étincelle.

**E. Généralisation. Effet de la  $n^{\text{ème}}$  étincelle.** — Il est évident (mais on peut le démontrer) que la  $n^{\text{ème}}$  étincelle augmente la charge de l'inducteur et par conséquent le champ exciteur, pourvu que A soit ionisé lors de cette étincelle.

Dans le cas où la longueur des étincelles est progressivement augmentée, la question se pose de déterminer quelle doit être

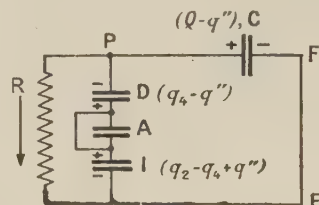


Fig. 13. — Schéma relatif à la deuxième étincelle ; A est ionisé.

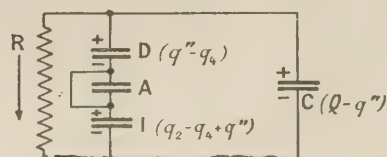


Fig. 13 bis. — Schéma relatif à la deuxième étincelle ; A est ionisé.

la valeur indispensable  $U_m$  de la tension sous laquelle doit éclater la dernière étincelle pour que les inducteurs soient complètement chargés. La recherche de  $U_m$  devant être faite en toute ignorance de la charge antérieure de l'inducteur, il faut se placer dans le cas le plus défavorable où ce dernier

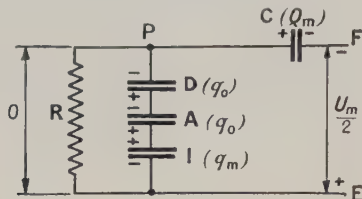


Fig. 14. — Schéma concernant une polarité invariable. Avant la  $n^{\text{ème}}$  étincelle.

a été presque complètement chargé lors de l'avant-dernière étincelle.

Compte tenu de la difficulté croissante de l'ionisation au fur et à mesure de la cumulation des charges inductrices, on aura pour  $U_m$  une valeur suffisante en considérant qu'une étincelle produite sous cette tension est capable d'ioniser A lorsque l'inducteur est déjà complètement chargé. Or, l'inducteur est complètement chargé lorsque, pendant la rotation du plateau le champ dans l'entreverre est voisin de sa valeur critique, c'est-à-dire lorsque la tension au condensateur élémentaire A est voisine de  $v_0$ , ou encore lorsque A porte la charge  $q_0 = Av_0$ , selon la figure 14. Soit  $q_m$  la charge correspondante de I pendant la rotation du plateau, on a, en écrivant que la tension de I équilibre la somme des tensions des condensateurs D et A porteurs de la même charge  $q_0$

$$\frac{q_m}{I} = \frac{q_0}{D} + \frac{q_0}{A}.$$

Au moment où l'étincelle éclate sous la tension cherchée  $U_m$ , le condensateur C qui avait la charge  $Q_m$  se décharge partiellement dans l'ensemble des trois condensateurs élémentaires D, A, I.

Soit  $x$  la charge qui traverse cet ensemble. Par hypothèse, la charge de A était  $q_0$ , sa nouvelle charge devient  $q_0 - x$ , comptée dans le sens de la polarité initiale, ou  $x - q_0$  comptée dans le sens inverse (nouvelle polarité), suivant la figure 15.

Pour que l'ionisation soit prête à se déclencher, il faut que

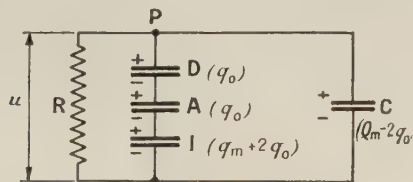


Fig. 15. — Schéma concernant une polarité invariable. Eclatement de la  $n^{\text{ème}}$  étincelle.

cette charge  $x - q_0$  de A retrouve la valeur critique  $q_0$ , c'est-à-dire que

$$x - q_0 = q_0 \quad \text{ou} \quad x = 2q_0,$$

de sorte que la charge de D, comptée dans le nouveau sens indiqué sur la figure 15, sera  $q_0$  tandis que celle de I devient  $q_m + 2q_0$ .

En écrivant que la somme des tensions des trois condensateurs élémentaires équilibre la tension de C possédant la charge  $Q_m - 2q_0$ , il vient

$$\frac{Q_m - 2q_0}{C} = \frac{q_0}{D} + \frac{q_0}{A} + \frac{q_m + 2q_0}{I}.$$

En remplaçant

$$\frac{q_m}{I} \text{ par } \frac{q_0}{D} + \frac{q_0}{A},$$

il vient

$$\frac{Q_m}{C} = 2q_0 \left( \frac{1}{D} + \frac{1}{A} + \frac{1}{I} + \frac{1}{C} \right) = 2q_0 \left( \frac{1}{M} + \frac{1}{C} \right).$$

En tenant compte de ce que

$$Q_m = \frac{CU_m}{2} \text{ et } q_0 = \frac{U_0}{2 \left( \frac{1}{M} + \frac{1}{C} \right)},$$

on a finalement

$$U_m = 2U_0.$$

Ce qui signifie que le chargement complet des inducteurs par une série d'étincelles peut être assuré avec une tension finale disruptive double de celle d'une source auxiliaire tout juste suffisante pour ioniser l'entreverre à la première étincelle.

**F. Étincelles dans le cas du schéma à polarité changeante.** — Sur les figures 16 et 17 relatives au schéma (B) de la figure 1, à polarité changeante, le point P aboutissant au peigne est relié directement au point E de l'éclateur, le condensateur D représentant la capacité à travers le plateau rotatif étant en face de P, tandis que le condensateur élémen-

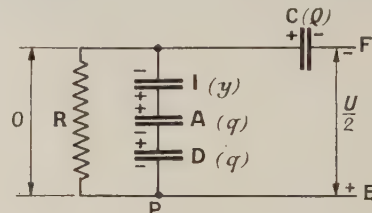


Fig. 16. — Schéma concernant une polarité changeante. Avant l'étincelle.

taire I, capacité locale entre les deux faces de l'isolant inducteur, est maintenant relié au condensateur C. La substitution du schéma (B) au schéma (A) ne change pas les conditions d'amorçage par une première étincelle. Par contre, les effets des étincelles suivantes sont bien différents lorsqu'on passe de l'un à l'autre schéma.

Suivant la figure 16, la génératrice étant en cours de fonctionnement à la tension  $U$  avant que n'éclate l'étincelle, le condensateur C porte la charge  $Q$  sous la tension  $U/2$ , puisque la différence de potentiel est en ce moment négligeable entre les extrémités de R. Supposons E momentanément positif. En adaptant ici les raisonnements déjà utilisés aux paragraphes précédents, on voit que :

1° La charge  $q$  des condensateurs D et A résulte de ce que I porte la charge  $y$  telle que

$$\frac{y}{I} = \frac{q}{A} + \frac{q}{D};$$

2° Cette charge  $y$  de I pendant la marche résulte elle-même de ce que la charge de I était  $y + q$  au moment où A était mis en court-circuit par l'ionisation de l'air de l'entreverre lors de l'étincelle précédente.

Suivant la figure 17, relative au moment où se produit une nouvelle étincelle, le condensateur C se décharge partiellement dans l'ensemble D, A, I. On voit que la charge  $q$  de A augmente, de sorte que l'ionisation en A se produit d'autant plus sûrement que  $q$  est plus proche de la charge critique  $q_0$ . C'est là une première différence à relever par comparaison avec le comportement de la machine à polarité invariable. Cette ionisation obtenue équivaut au court-circuit momentan-

de A et si  $x$  est la charge fournie par C dans l'ensemble D et I, on voit que la charge de I devient égale à  $y - x$ , c'est-à-

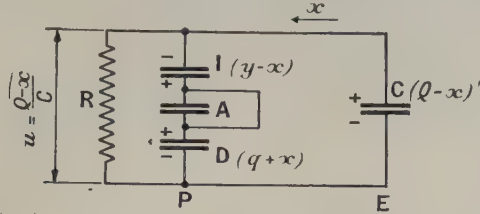


Fig. 17. — Schéma concernant une polarité changeante. Eclatement de l'étincelle.

dire diminue, seconde différence à relever dans le comportement des génératrices. Si  $x$  est supérieur à  $y$ , la charge de I va s'inverser et peut être désignée par  $x - y$  dans ce nouveau sens.

Pour qu'en cette fin d'ionisation de A, la charge de I reprenne la même valeur absolue  $y + q$  qu'elle avait acquise lors de la précédente étincelle, il faut que

$$x - y = y + q,$$

c'est-à-dire que

$$x = 2y + q,$$

faute de quoi il y aurait affaiblissement de la charge de l'in-

ducteur et diminution consécutive de l'excitation en marche après la nouvelle étincelle. En négligeant, comme il convient, la consommation de R jusqu'au moment où finit l'ionisation de A, on peut écrire que la tension du condensateur C portant la charge  $Q - x$  équilibre la somme des tensions des condensateurs C et D qui portent respectivement les charges  $x - y$  et  $x + q$

$$u = \frac{Q - x}{C} = \frac{x - y}{I} + \frac{x + q}{D}.$$

Cette équation jointe aux deux précédentes permet l'élimination de  $x$  et de  $y$

$$\frac{U}{2} = \frac{Q}{C} = q \left[ \frac{1}{C} + \frac{1}{A} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I} + 2I \times \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{D} \right) \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{D} \right) + \frac{2}{D} \right].$$

Soit  $U_m'$  la tension de la génératrice pour laquelle  $q$  atteint la limite  $q_0$

$$q_0 = \frac{U_0}{2 \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{A} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right)}.$$

Il vient

$$\frac{U_m'}{2} = \frac{U_0 \left[ \frac{1}{C} + \frac{1}{A} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I} + 2I \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{D} \right) \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{D} \right) + \frac{2}{D} \right]}{2 \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{A} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I} \right)},$$

c'est-à-dire

$$\frac{U_m'}{U_0} = 1 + 2 \frac{\frac{I}{D} \cdot \frac{1}{C} + \frac{I}{D} \cdot \frac{1}{A} + \left( \frac{I}{D} + 1 \right) \cdot \frac{1}{D} + \left( \frac{I}{C} \cdot \frac{I}{A} \right) \cdot \frac{1}{I}}{\frac{1}{C} + \frac{1}{A} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I}}.$$

La fraction affectée du coefficient 2 peut être voisine de 1, ou même plus grande, parce que  $I/D$  est généralement voisin de 1, ou même plus grand, tandis que  $I/C \times I/A$  peut être voisin de 1 (c'est-à-dire si  $I/C$  est voisin de  $A/I$ ).

D'ailleurs, s'il n'en est pas ainsi, c'est-à-dire si  $C$  devient grand, la fraction tend vers la limite

$$\frac{\frac{I}{D} \cdot \frac{1}{A} + \frac{1}{D} + \left( \frac{I}{D} \right)^2 \times \frac{1}{I}}{\frac{1}{A} + \frac{1}{D} + \frac{1}{I}}$$

dont la valeur reste encore voisine de 1. Par conséquent,  $U_m'/U_0$  doit, de toute façon, être voisin de 3.

Cela veut dire que les inducteurs d'une génératrice à polarité changeante (schéma B) seront complètement chargés lorsque les étincelles se produiront en marche sous une tension  $U_m'$  voisine du triple de la tension  $U_0$  d'une source auxiliaire tout juste suffisante pour ioniser l'entreverre à la première étincelle.

D'autre part, si l'on compare  $U_m'$  à  $U_m$  du chapitre précédent, on voit que  $U_m'/U_m$  doit être voisin de 3/2, ce qui veut dire que pour charger complètement les inducteurs pendant la marche, le montage à polarité changeante exige une tension valant 1,5 fois celle qui est nécessaire au montage à polarité invariable.

**G. Rôle des diélectriques et des résistances dans l'ionisation secondaire.** — Les paragraphes précédents font état de l'ionisation dite primaire. Mais la face externe de l'isolant inducteur chargée par ce moyen risque d'être déchargée par une ionisation dite secondaire qui peut se produire au moment où le potentiel du peigne est ramené au potentiel de l'armature, notamment dans le cas où l'inducteur est surabondamment chargé par une très grande tension disruptive,

sans compter l'aggravation due à ce que le champ électrique peut s'intensifier localement lorsque la génératrice produit une tension élevée.

Cette ionisation secondaire est particulièrement à craindre dans les génératrices à connexions changeantes dont il est question dans la première partie et où l'égalisation des potentiels du peigne et de l'armature s'effectue brutalement. Pour l'éviter, il faut alors recourir soit à un isolant inducteur possédant des propriétés résiduelles très accentuées, soit à un artifice, qui consiste à interposer une couche à haute résistivité entre l'isolant et l'armature de l'inducteur. Le rôle de cette couche peut s'expliquer de la façon suivante : grâce au lent passage des charges électriques qui peut s'effectuer à travers cette couche, celle-ci peut être considérée comme faisant partie de l'armature conductrice hors des moments où se produisent de brusques variations de différence de potentiel entre le peigne et l'armature.

Par contre, cette couche se comporte comme un diélectrique, notamment lors du contact des liaisons de marche, de sorte que tout amorçage d'ionisation secondaire, qui tend à produire un déplacement supplémentaire et rapide de charges, est contrariée par le comportement de la couche qui s'interpose alors, en tant qu'isolant supplémentaire, entre le métal de l'armature et les charges de la face interne du diélectrique inducteur, cette protection ayant d'ailleurs l'avantage de pouvoir s'effectuer localement, en face de la région où le champ atteint, dans l'entreverre, la valeur la plus dangereuse. On y parvient si la constante de temps de la couche (1)

(1) On a, en secondes,  $t = \frac{K\rho}{4\pi \times 9 \times 10^{11}}$ , en désignant par  $K$  la permittivité et par  $\rho$  la résistivité en ohms-cm.

est négligeable devant la durée du mouvement de retour des bras conducteurs en connexions de marche, tout en étant grande devant la durée des rapides variations de potentiel qui se produisent entre peigne et armature, soit lors du contact des bras entre eux, soit lors de leur contact avec les peignes.

Mais la couche à haute résistivité ne semble pas s'imposer dans les inducteurs de la nouvelle machine où l'égalisation

des potentiels du peigne et de l'armature s'effectue par l'intermédiaire d'une grande résistance, qui peut être le siège de chutes de tensions protectrices lorsque l'ionisation secondaire tend à s'amorcer, quoique l'action locale préférentielle dont il a été question avec la couche, disparaisse.

C'est en prévision de cette simplification qu'il n'a pas été tenu compte de la présence de la couche dans le condensateur élémentaire I.

## TROISIÈME PARTIE : Expérimentation du nouveau procédé de recharge des inducteurs. Expérimentation du montage à polarité invariable.

**I. Montage utilisé.** — Suivant le schéma (A) de la figure 6, le plateau rotatif est monté avec deux peignes P et P', influencés respectivement par les deux inducteurs I et I'.

L'inducteur I est relié en permanence au peigne P par la résistance R et une résistance R' relie en permanence I' à P'.

Les connexions conductrices vont des inducteurs à l'éclateur. Deux condensateurs C, C' sont interposés en série entre les peignes, ces derniers ne communiquant à l'éclateur que par l'intermédiaire de R et R'. Le fonctionnement ne devant pas exiger de changements de connexions, celles-ci sont toutes permanentes. L'expérimentation est faite sans protection dans une atmosphère normale dont l'humidité relative dépasse souvent 60 pour 100.

**II. Description des organes utilisés.** — **A. Plateau rotatif.** — Le plateau, en ébonite, de 250 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur, est monté sur un arbre en fer muni d'une poulie.

**B. Peignes.** — Chaque peigne comprend un cylindre de laiton à bouts hémisphériques, sur lequel est soudé la partie active constituée soit par une lame de clinquant de laiton de 50 mm de longueur, soit par une rangée de même longueur de pointes en fil d'acier au chrome-nickel, dit alliage RNC2, distantes empiriquement les unes des autres de 3 mm <sup>(1)</sup>.

**C. Inducteurs.** — L'armature métallique d'environ 60 mm de diamètre de chaque inducteur est recouverte d'une couche isolante de 2 mm d'épaisseur en forme de coquille en résine de styrolène de permittivité égale à 2,4. Deux sortes de coquilles ont été essayées. Pour la protection périphérique de l'armature, j'ai dû renoncer au boîtier à deux coquilles dont le collage subissait des ruptures diélectriques, pour adopter la coquille unique à col. Plusieurs sortes d'inducteurs ont été essayés qui comportaient une feuille de carton de 0,2 mm d'épaisseur imprégnée d'huile, interposée entre l'armature et la coquille, ou bien une feuille de buvard imprégnée avec diverses huiles conductrices dont la résistivité était supérieure à 100 MΩ-cm, pour constituer la couche à haute résistivité dont il a été question. L'inducteur sans couche à haute résistivité n'a été essayé qu'en quatrième partie.

<sup>(1)</sup> La longueur de 50 mm correspond environ, pour le plateau de diamètre  $D = 250$  mm, à un écartement entre les deux peignes

$$x_0 = \frac{D}{\sqrt{3}} = \frac{250}{1,73} = 145 \text{ mm,}$$

qui doit procurer le maximum de puissance, celle-ci étant proportionnelle à  $x(D^2 - x^2)$  si l'on admet que la tension disruptive entre les peignes est sensiblement proportionnelle à l'écartement  $x$  des peignes et que le courant est proportionnel à  $D^2 - x^2$ .

**D. Résistances R et R'.** — Les caractéristiques de ces résistances sont les suivantes :

Baguettes de bois blanc ou en bois oukumé :

| Diamètres (mm) | Longueurs (mm) |
|----------------|----------------|
| 8              | 50 à 53        |
| 13             | 80             |

Imprégnation partielle soit dans de l'eau non distillée, soit dans une solution de chlorure de calcium dans l'eau.

Les valeurs mesurées au moment de l'emploi s'échelonnent de 50 000 à 215 000 Ω.

Baguettes utilisées dans les montages radioélectriques :

| Aggloméré massif :                           |                |                 |
|----------------------------------------------|----------------|-----------------|
| Diamètres (mm)                               | Longueurs (mm) | Résistances (Ω) |
| 10                                           | 50             | 20 000          |
| 15                                           | 63             | 300 000         |
| Porcelaine à couche résistante hélicoïdale : |                |                 |
| 6                                            | 54             | 70 000          |
| 6                                            | 54             | 200 000         |
| 6                                            | 54             | 700 000         |
| 6                                            | 54             | 900 000         |

**E. Condensateurs C et C'.** — Chacun de ces condensateurs est constitué par un gobelet en résine de styrolène (Rhodolène), d'épaisseur 2 mm, de diamètre au fond de 50 mm, dont on change à volonté les armatures.

**F. Éclateur.** — L'éclateur E, E' relié aux bornes de la génératrice comporte deux sphères de laiton de 50 mm de diamètre supportées par deux gobelets condensateurs à glissière dont la capacité résultante K est environ 40 unités électrostatiques C.G.S., soit un peu plus de  $4 \times 10^{-8} \mu\text{F}$ , sauf lorsqu'il est fait mention d'une autre valeur.

La tension disruptive est évaluée d'après la longueur d'étincelle à l'aide d'une courbe établie à partir des potentiels explosifs déterminés par Abraham et Villard dans les conditions habituelles dans l'air à la température de 15° C et à la pression atmosphérique normale, c'est-à-dire :

|              |                               |
|--------------|-------------------------------|
| 32,3 kV pour | 1 cm de longueur d'étincelle. |
| 106, —       | 5 cm —                        |
| 142, —       | 10 cm —                       |
| 153, —       | 12 cm —                       |

**III. Expérimentation.** — On amorce la génératrice :

1° Soit en électrisant négativement la surface de l'inducteur I' en la frottant avec de la laine ou avec du clinquant. Ceci peut suffire, mais l'amorçage est plus vigoureux si on électrise, d'autre part, la surface de l'inducteur I en la chargeant positivement avec la tranche du plateau d'un petit électrophore. La polarité est alors P +, P' — ;

2° Soit en faisant jaillir à l'éclateur une ou plusieurs étin-

celles alimentées par une source auxiliaire. La génératrice prend alors la polarité de la source.

Lorsque la génératrice fonctionne sans produire d'étincelles, en alimentant, par exemple, un effluve, on constate que le courant qu'elle débite à vitesse constante diminue progressivement et d'autant moins vite que l'air est plus sec. Cette diminution mesurée au microampèremètre ou simplement appréciée au bruit et à l'aspect de l'effluve prouve que la charge des inducteurs diminue.

Pour faire jaillir les étincelles à l'éclateur en parallèle avec les fils qui aboutissent aux conducteurs entre lesquels se produit l'effluve, il suffit d'écarter davantage l'un de l'autre de ces conducteurs. On fait cesser les étincelles en rétablissant la longueur initiale de l'effluve et on mesure à nouveau le courant. Si ce dernier reste faible, c'est que les inducteurs ne sont pas rechargés ; s'il remonte à son intensité normale, c'est que les inducteurs sont rechargés.

On peut ainsi, à la suite de plusieurs essais exécutés avec divers écartements des sphères de l'éclateur, déterminer la tension disruptive qui assure le rechargement des inducteurs, ou tension minimum de rechargement. La polarité de la génératrice reste invariable.

On peut opérer d'une façon plus expéditive : le courant ayant faibli, on s'arrange pour faire jaillir à l'éclateur des étincelles de faible longueur, puis on écarte progressivement l'une de l'autre les sphères de l'éclateur : la cadence des décharges augmente brusquement lorsque l'écartement des sphères correspond à la tension minimum de rechargement, dans les conditions où l'on se trouve. Naturellement, les inducteurs sont à plus forte raison rechargés, lorsque la tension disruptive est supérieure à ce minimum.

La génératrice fonctionne quel que soit le sens de rotation et en gardant la même polarité.

**A. Observations faites dans l'obscurité.** — A la diminution de la charge des inducteurs correspond un affaiblissement des points lumineux en face des pointes du peigne positif P et des filets lumineux en face de P'.

L'extinction s'effectue progressivement en commençant par le côté le plus rapproché de l'arbre du plateau. On aboutit à l'extinction totale si l'on prolonge l'intervalle de temps entre deux étincelles. Lorsque l'étincelle n'assure pas la recharge des inducteurs (cas d'une trop faible tension disruptive), le nombre des points et des filets n'augmente pas et continue à diminuer.

Si la tension disruptive est suffisante, on voit réapparaître simultanément tous les points et filets lumineux. Dans le cas où les étincelles se succèdent, ces points et filets paraissent persister sans aucune discontinuité. Mais, on sait qu'il se produit nécessairement un changement momentané du sens de transfert des charges entre le peigne et le plateau pendant la courte durée de l'étincelle.

**B. Choix des résistances R et R'.** — Les baguettes de bois conviennent, à part quelques irrégularités dues à ce que la haute tension produite entre les extrémités de la baguette par l'éclatement de l'étincelle à l'éclateur, engendre parfois une décharge de bout en bout à l'intérieur du bois (bien décelable à travers le bois blanc dans l'obscurité).

Même des bouts de branche fraîchement coupée sur un orme ont été essayés avec succès. Mais, de toute façon, le bois est exposé à une dessiccation rapide qui augmente exagérément sa résistance. Les irrégularités disparaissent avec les baguettes utilisées en radioélectricité. Cependant, si les baguettes sont trop courtes, soit par exemple 26 mm, la surtension entre

les extrémités crée une décharge qui, cette fois, passe à l'extérieur de la baguette.

Des résistances de 0,9 à 1 M $\Omega$ , de 300 000  $\Omega$ , de 70 000  $\Omega$ , de 50 000  $\Omega$ , de 20 000  $\Omega$  ont pu assurer le rechargement convenable des inducteurs. Seulement, la tension disruptive minimum augmente au fur et à mesure que R et R' diminuent. Cette tension monte par exemple de 45 kV à 50 kV lorsque R passe de 1 M $\Omega$  à 20 000  $\Omega$ , à condition d'avoir des capacités C et C' d'au moins 20 unités électrostatiques C.G.S. (gobelets fond contre fond, sans armature externe).

Quelle que soit la résistance, de 20 000  $\Omega$  à 1 M $\Omega$ , l'intensité du courant mesuré aussitôt après l'étincelle reste la même (soit 30  $\mu$ A en court-circuit à 1 450 t : mn, avec un entreverre de 0,5 mm, cette intensité étant d'ailleurs celle qui est obtenue dans les mêmes conditions avec le montage à connexions mobiles cité en première partie (fig. 5)).

Le rechargement s'effectue encore lorsque R est différent de R' tout en restant cependant du même ordre de grandeur. Si R et R' sont trop différents l'un de l'autre, si par exemple on associe 20 000 à 250 000  $\Omega$ , la surtension se porte surtout sur cette dernière résistance et provoque sur elle une décharge externe de bout en bout.

En résumé, la machine s'accommode soit de résistances de nature électrolytique (bois humidifié), soit de la plupart des compositions essayées, en couche ou même massives, malgré la décroissance plus ou moins grande de leur valeur en fonction de la tension.

Mais la constitution de l'aggloméré a cependant une importance fondamentale et on aboutit à des échecs si l'on n'en tient pas compte.

C'est ainsi que des bâtonnets massifs à base de carbone, de dimensions convenables (10 mm de diamètre, 50 mm de longueur), dont la résistance mesurée en basse tension était 100 000  $\Omega$  se sont montrées absolument incapables à assurer le rechargement, même sous des tensions disruptives très élevées, ces baguettes n'étant le siège que d'insignifiantes chutes de tension lors de l'étincelle. Il s'agit dans ce cas d'un comportement analogue à celui des semi-conducteurs électroniques où le passage du courant s'effectue sous forme de petits effluves internes entre les grains conducteurs séparés par de très petits intervalles de l'ordre du micron, de sorte que la résistance est une fonction décroissante de la tension. Ceci est recherché pour les résistances de parafoudres dont la valeur varie en raison inverse de la puissance 2 ou 3 et même 4 de la tension, tandis qu'il faudrait un comportement inverse pour R.

Comme a bien voulu me le signaler M. Ch. Ledoux, ingénieur conseil aux Etablissements industriels D. Soulé, il est fort probable que la meilleure solution consiste à utiliser la conductibilité métallique qui, tout en étant directement indépendante de la tension, décroît avec la température. Dans le cas d'un filament de tungstène porté au rouge par la surtension, ou dans le cas d'une résistance en fer dans l'hydrogène, on bénéficierait d'une augmentation presque instantanée de R pendant la décharge à l'éclateur.

**C. Intervention des capacités des condensateurs C et C'.**

— Pour des valeurs données de R et R', la diminution des capacités de C et C' accroît le minimum de tension disruptive.

Par exemple, si R est compris entre 0,3 et 1 M $\Omega$ , la tension disruptive de 45 à 46 kV assure le rechargement des inducteurs lorsque C vaut 20 unités électrostatiques C.G.S. (gobelets fond contre fond, sans armature externe), mais ne les recharge plus lorsqu'on diminue C en écartant les fonds à 20 mm l'un de l'autre. L'étincelle ne produit alors son effet que si elle éclate à 60 ou 65 kV.

Lorsque  $C$  est grand, par exemple de l'ordre de 80 unités électrostatiques C.G.S. (gobelets avec armatures externes) et que  $R$  est voisin du mégohm, on peut recharger les inducteurs sans éclateur ni condensateur externe  $K$ . Il suffit de mettre en court-circuit brusquement les bornes de la génératrice avec un conducteur quelconque à manche isolant.

Cette possibilité peut avoir de l'importance dans le cas où il est désirable d'éviter tout effet de décharge disruptive sur l'appareil d'utilisation connecté à la génératrice ou pour éviter tout effet physiologique désagréable sur l'opérateur exposé à recevoir une décharge. En outre, l'élimination de l'éclateur et de son condensateur constitue une notable simplification.

Lorsque la génératrice est au contraire destinée à alimenter de fréquentes étincelles sous tension donnée avec une capacité  $K$  déterminée, l'expérience montre qu'on a avantage à diminuer  $C$  le plus possible afin que la tension disruptive utilisée soit juste suffisante pour assurer la recharge complète des inducteurs. S'il n'en est pas ainsi, chaque étincelle provoque indirectement un certain gaspillage d'énergie dans la génératrice, du fait que les inducteurs sont chaque fois surabondamment chargés tout en étant ensuite ramenés à leur charge habituelle par une ionisation secondaire plus ou moins importante. Cette considération est à retenir car la diminution de  $C$  tend à faciliter la construction du condensateur incorporé dans la génératrice.

Une autre constatation est que, quand la capacité  $K$  du condensateur de l'éclateur est petite devant la capacité  $C/2$  de l'ensemble  $C$  et  $C'$ , les inducteurs sont ou mal ou pas du tout rechargés lors de l'étincelle, surtout si les résistances  $R$  et  $R'$  ne sont pas très grandes. C'est que, dans ce cas, la décharge à l'éclateur se trouve perturbée par le circuit de la génératrice, contrairement à ce que supposent tous les raisonnements qui ont servi de base à la théorie du fonctionnement.

**D. Observations particulières.** — L'amorçage tenté sous des tensions disruptives inférieures à 40 kV (à l'aide d'une source auxiliaire) peut aboutir à un début de fonctionnement très médiocre de la génératrice. Ceci prouve que l'entreverre peut être ionisé sans que les inducteurs acquièrent assez de charge pour le fonctionnement normal, c'est-à-dire que ce dernier ne peut être assuré qu'à la suite de l'emploi d'une tension disruptive supérieure à celle qui commence à provoquer indirectement l'ionisation de l'entreverre.

Dans le cas où la génératrice produit péniblement des étincelles de 25 kV, il est parfois possible d'élever progressivement la tension en écartant peu à peu l'une de l'autre les sphères de l'éclateur jusqu'au moment où la tension atteint le minimum indispensable au rechargement complet des inducteurs. Mais ce procédé peut échouer en raison de ce que l'accroissement de la longueur des étincelles n'est pas toujours suivi d'une amélioration du fonctionnement, ce qui prouve que l'ionisation est de plus en plus difficile à déclencher au fur et à mesure de l'accroissement de la charge des inducteurs, toutes choses dont la concordance est à noter avec les considérations émises dans la deuxième partie.

Le courant fourni par la génératrice dont les inducteurs ont seulement été chargés sous l'effet d'étincelles jaillissant à l'arrêt du plateau (à l'aide d'une source auxiliaire) est nettement inférieur au courant fourni lorsque les inducteurs ont été rechargés par les étincelles jaillissant en marche.

D'autre part, l'amorçage est difficile lorsque le plateau est immobile. Des décharges à 50 kV n'y suffisent généralement pas. Il faut 60 kV ou davantage. Par contre, lorsque le plateau tourne et surtout s'il tourne vite, l'amorçage

s'effectue bien à 45 kV. Mais la différence est encore sensible entre les deux procédés, même si la poulie de la génératrice est simplement tournée à la main.

Ainsi, les prévisions du paragraphe de la deuxième partie relatif à l'influence du mouvement du plateau sur l'amorçage se trouvent confirmées qualitativement et même mieux qu'on ne pouvait s'y attendre pour les faibles vitesses de rotation, quoique les essais soient rendus difficiles par l'absence de protection contre l'humidité de l'atmosphère qui dépasse souvent 60 pour 100. Ces essais seront complétés dans la quatrième partie.

#### IV. Expérimentation du montage à polarité changeante. — A. Montage utilisé.

— Les organes sont les mêmes que les précédents. Chacune des résistances  $R$  et  $R'$  est encore connectée entre peigne et inducteur, mais, conformément au schéma B de la figure 6, les connexions conductrices vont des peignes à l'éclateur, tandis que les condensateurs  $C$  et  $C'$  sont interposés entre les inducteurs. Toutes les connexions sont permanentes. L'expérimentation est encore faite sans protection dans l'atmosphère ordinaire.

**B. Expérimentation.** — L'amorçage peut être obtenu comme pour le montage précédent, soit en électrisant au préalable les inducteurs, l'un avec de la laine, l'autre avec un électrophore, soit en utilisant une source auxiliaire. Dans ce dernier cas, si le plateau tourne, la source alimente une seule décharge qui doit donner d'emblée aux inducteurs une charge pour assurer l'excitation suffisante de la génératrice qui se met aussitôt à débiter pour charger l'éclateur en sens inverse. Par contre, si le plateau est arrêté, la source peut alimenter plusieurs étincelles, mais encore faut-il que la tension disruptive soit assez élevée pour rendre les inducteurs capables d'exciter assez fortement la machine qui doit pouvoir fournir ensuite d'elle-même une tension élevée. En effet, toute étincelle sous tension insuffisante désamorce complètement la machine, risque auquel on n'était pas exposé avec le précédent montage.

Conformément aux prévisions faites à la fin de la deuxième partie, le rechargement complet des inducteurs nécessite une tension disruptive plus élevée en montage à polarité changeante qu'en montage à polarité invariable, soit environ 60 à 70 kV au lieu de 45 à 50 kV, le rapport prévu  $3/2$  étant de ce fait sensiblement confirmé.

Le changement de polarité après chaque étincelle est prouvé soit par l'observation faite dans l'obscurité de la permutation entre les points et les filets lumineux aux peignes, soit par le comportement d'un électroscope chargé, placé à une certaine distance d'un pôle.

La régularité de la cadence des étincelles est à certains moments troublée par une diminution passagère (entre deux étincelles) du courant de la génératrice qui semble imputable à un raté du rechargement des inducteurs par suite des perturbations que peuvent causer les charges parasites; celles-ci d'après l'étude faite en deuxième partie, doivent être plus importantes et par conséquent plus gênantes que dans le montage à polarité invariable.

Comme curiosité, on peut citer le cas où les boules de l'éclateur sont de diamètres très différents de telle sorte que l'étincelle ne peut éclater qu'avec la petite boule positive; la polarité inverse ne pouvant produire qu'un effluve.

La machine ayant donné une étincelle, la polarité s'inverse et il se produit un effluve à l'éclateur, effluve incapable de recharger les inducteurs. Cet effluve persiste jusqu'à ce que l'opérateur intervienne en exécutant un brusque court-circuit

aux boules, ce qui recharge alors les inducteurs en sens inverse. La polarité redevient apte au jaillissement de l'étincelle, laquelle fait à nouveau changer la polarité pour pro-

duire l'effluve, et ainsi de suite. Comme pour le précédent montage, toutes les observations sont indépendantes du sens de rotation du plateau.

## QUATRIÈME PARTIE : Application à une nouvelle génératrice. Résultats obtenus

**I. Description.** — Il s'agit d'une génératrice bipolaire à double transport, à un seul plateau, à inducteurs à couche isolante rechargés par l'ionisation indirecte due aux étincelles de l'éclateur, suivant le schéma (A) de la figure 1, à polarité invariable.

Tous les organes, sauf l'éclateur, sont enfermés entre deux dasques isolants qui forment un boîtier protecteur contenant fin déshydratant. Suivant le croquis de la figure 18, les bornes de la génératrice sont connectées directement aux armatures des inducteurs. Il n'y a pas d'autre communication avec l'extérieur, car les peignes P et P' sont reliés seulement

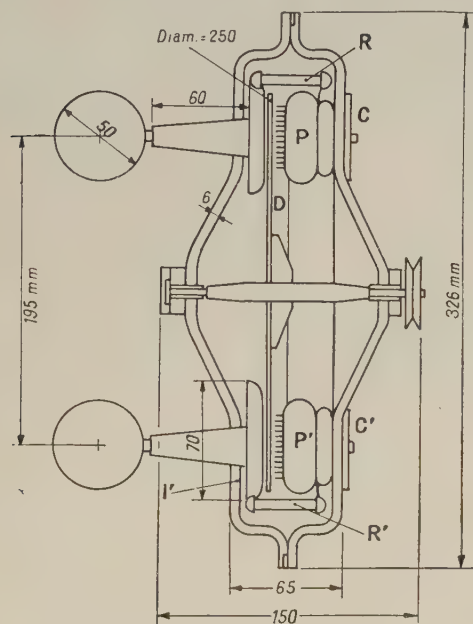


Fig. 18. — Coupe de la génératrice électrostatique.

à leurs inducteurs respectifs I et I' par les baguettes résistantes R et R'. Le flasque du côté poulie sert de diélectrique aux condensateurs C et C'. Dans ce but, deux disques externes, de 50 mm de diamètre, en clinquant, reliés l'un à l'autre par un fil conducteur sont collés sur le flasque vis-à-vis des bases circulaires de 50 mm de diamètre des peignes. Avec du plexiglass de 6 mm d'épaisseur (constante diélectrique 3,6) la capacité approximative de C est de 9 unités électrostatiques C.G.S., soit  $10^{-5}$   $\mu$ F.

Le plateau rotatif, de 250 mm de diamètre et 2 mm d'épaisseur, est en plexiglass enduit du vernis hydrofuge résine de styrolène-benzène. Comme dans les montages expérimentés, chaque peigne comporte des pointes disposées sur une rangée de 50 mm, tandis que l'armature de chaque inducteur est recouverte d'une coquille en résine de styrolène de 2 mm d'épaisseur avec ou sans interposition de couche à haute résistivité.

Les baguettes R et R', de 50 mm de longueur et de 6 mm de diamètre, ont été constituées avec des résistances à couche

spiralee sur corps de porcelaine du type utilisé en radioélectricité et de valeur 200 000 ou 700 000  $\Omega$ , suivant les essais.

Les flasques en plexiglass, moulés par l'Atelier industriel de l'Air de Maison-Blanche, ont un diamètre extérieur de 326 mm et portent, l'un des sorties coniques collées, en résine de styrolène, pour compléter l'isolement des bornes ; l'autre un gobelet à couvercle contenant un sac de carbagel (40 g). L'herméticité n'étant pas complète à cause de la fuite par le coussinet du côté poulie, la dessiccation est entretenue pendant un temps qui dépend de l'humidité atmosphérique ambiante et de l'utilisation de la machine qui « respire » plus ou moins. Au repos, l'amorçage peut persister plus de six mois à Maison-Carrée.

Quatre pieds en plexiglass complètent cette génératrice qui pèse environ 2 kg.

**II. Fonctionnement.** — A. Amorçage. — On peut amorcer la machine :

1° en frottant la surface de l'inducteur négatif avec de la laine ou du clinquant. Facultativement, on peut compléter l'opération en électrisant positivement la surface de l'autre inducteur avec la tranche du plateau d'un petit électrophore. Ce procédé nécessite l'ouverture des flasques, aussi a-t-il été remplacé par le suivant ;

2° par un trou (normalement obturé par une vis), de la partie supérieure du flasque des inducteurs on introduit une aiguille constituée par un fil de cuivre à court manche isolant, dont on loge la pointe entre le plateau rotatif et l'inducteur négatif, à la hauteur du peigne correspondant. On décharge alors le plateau d'un petit électrophore (70 mm de diamètre) sur la borne négative de la génératrice déconnectée de l'éclateur, pendant qu'on touche du doigt le métal de l'aiguille, près du manche.

On loge ensuite la pointe de l'aiguille sur la face de l'inducteur positif, à hauteur du peigne, et on décharge cette fois le plateau de l'électrophore sur l'aiguille pendant qu'on touche du doigt la borne positive de la génératrice. On prend soin de retirer l'aiguille en la tenant par son manche ;

3° si l'on dispose d'une source auxiliaire capable de produire une décharge d'au moins 40 kV à l'éclateur pendant qu'on fait tourner le plateau de la génératrice. L'amorçage est rendu plus difficile par l'immobilisation du plateau : il faut alors 60 à 70 kV, conformément à la théorie exposée précédemment en deuxième partie.

**B. Rechargement des inducteurs.** — Les inducteurs se rechargent automatiquement à chaque étincelle pourvu que la tension disruptive dépasse 40 ou 60 kV, suivant l'entre-verre et suivant l'épaisseur de la couche à haute résistivité, lorsqu'il y en a une. Des essais ont été faits sans cette couche et ont montré que la génératrice fonctionnait normalement, du moins avec les valeurs assez élevées indiquées pour R et R'. Il convient de retenir cette simplification.

On peut montrer que la tension minimum de rechargement dépend de la capacité qui shunte l'éclateur, la diminution de cette capacité nécessitant une augmentation de cette tension. Ainsi, lorsque l'éclateur est dépourvu de tout condensateur (ordinairement 40 unités électrostatiques C.G.S.),

il faut élever la tension jusqu'à 80 kV pour que les étincelles entre sphères de 50 mm de diamètre puissent encore recharger indirectement les inducteurs, ce qui est facile puisque la génératrice peut fournir 100 kV.

Les tensions dont il s'agit concernent l'obtention de la recharge complète des inducteurs (excitation maximum), ce qui n'exclut pas la recharge partielle sous des tensions disruptives plus basses que les précédentes. Grâce à l'élimination des pertes dues à l'humidité, il est possible de ranimer la génératrice quand sa tension ne peut pas excéder une vingtaine de milliers de volts, par suite d'un affaiblissement de l'excitation survenue en cours d'expérience. Dans ce cas, il convient de faire éclater des étincelles en augmentant très lentement leur longueur, millimètre par millimètre, en revenant au besoin en arrière pour les entretenir. Puis les étincelles se produisent de mieux en mieux et leur cadence s'accroît brusquement aux environs de 40 kV (pour une capacité de 40 unités électrostatiques C.G.S. à l'éclateur).

Une constatation analogue a été faite au cours de la troisième partie. Ici, elle est plus nette et montre quantitativement que la naissance du rechargement correspond à la moitié de la tension qui peut procurer le rechargement normal. Comme la naissance du rechargement correspond au commencement de la possibilité d'ionisation de l'entreverre, on peut dire que la tension de 20 kV est voisine de la tension disruptive  $U_0$  commençant à ioniser l'entreverre.

La valeur de  $U_0$  peut s'évaluer de la façon suivante (page 10) :

Elle doit correspondre à un champ de 57 000 V/cm dans l'entreverre de 0,5 mm, soit à travers la couche d'air à une différence de potentiel

|                                                                             |          |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------|
| 57 000 $\times$ 0,05 cm.....                                                | 2 850 V  |
| A travers le plateau de 2 mm (constante diélectrique 3,6), où le champ est  |          |
| 57 000/3,6 = 15 800 V/cm, soit                                              |          |
| 15 800 $\times$ 0,2 .....                                                   | 3 160 V  |
| A travers la résine de 2 mm (constante 2,4 de l'inducteur), où le champ est |          |
| 57 000/2,4 = 23 800 V/cm, soit                                              |          |
| 23 800 $\times$ 0,2 .....                                                   | 4 760 V  |
| D'où, entre peigne et inducteur                                             |          |
| 2 850 + 3 160 + 4 760 .....                                                 | 10 770 V |

Cette tension doit exister au condensateur C au moment de l'amorçage de l'ionisation. A ce moment, il faut donc une tension double, soit  $10 770 \times 2 = 21 540$  V pour l'ensemble des deux condensateurs C et C' montés en série. Par conséquent, il faut que la tension initiale de cet ensemble soit au moins égale à 21 540 V, tension initiale qui n'est autre que celle de la génératrice lorsque l'étincelle va éclater et qui est en effet voisine de la tension de 20 kV observée.

**C. Rôle du mouvement du plateau pendant l'étincelle.** — L'expérience est destinée à montrer quantitativement le rôle favorable du mouvement du plateau lors du rechargement des inducteurs.

On commence par neutraliser les inducteurs en déplaçant un fil métallique sur leur face isolante. Puis, le plateau restant immobile, on fait jaillir à l'éclateur une ou plusieurs étincelles sous 70 kV, à l'aide d'une source auxiliaire, comme pour l'amorçage. On met ensuite en court-circuit la génératrice par un microampèremètre et on la fait tourner pour mesurer le courant à une vitesse déterminée. L'essai doit être renouvelé, étant entendu qu'on recommence chaque fois à neutraliser les inducteurs.

Ces mesures montrent que le courant de court-circuit obtenu dans ces conditions atteint tout juste 40  $\mu$ A à 3 000 t/mn, tandis qu'à cette même vitesse, la génératrice est capable de fournir, dans l'état où elle se trouve lors de l'expérience, un courant de court-circuit de 55  $\mu$ A après l'éclatement d'étincelles pendant la rotation du plateau, sous la même tension disruptive de 70 kV.

Cette expérience justifie les prévisions faites en première partie au sujet de la nécessité de faire jaillir les étincelles pendant la rotation du plateau pour obtenir le maximum d'excitation.

**III. Résultats obtenus.** — Les fuites par conduction et par effluves sont si réduites dans la génératrice qu'il est aisé d'obtenir des décharges sous 100 kV à l'éclateur, en tournant la poulie à la main. Toutefois, il convient de ne pas dépasser cette tension, au-delà de laquelle le désamorçage peut survenir avec la disposition actuelle du moins, parce que le champ électrique devient si élevé en certaines régions que des

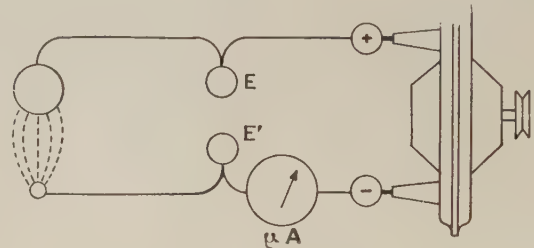


Fig. 19. — Schéma de la disposition des appareils lors des essais.

décharges internes peuvent se déclencher, notamment entre les peignes, par l'intermédiaire de l'arbre du plateau, d'où une brusque diminution de la différence de potentiel entre les peignes, qui provoque l'ionisation de déchargement dans l'entreverre.

D'autre part, un champ tangentiel très intense dans la région de l'inducteur peut directement provoquer un glissement des charges excitatrices sur la surface de l'isolant inducteur. Cependant des essais m'ont permis d'atteindre exceptionnellement 110 kV.

Le courant fourni par la génératrice a été mesuré à différentes vitesses et sous diverses tensions en absorbant l'énergie par effluve de longueur réglable entre deux conducteurs, suivant la disposition représentée en figure 19. Sur cette figure, l'éclateur E E' à gobelets condensateurs sert à la fois

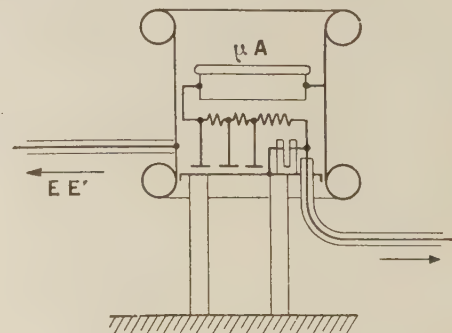


Fig. 20. — Schéma relatif à la protection du microampèremètre.

à produire les étincelles nécessaires au rechargement intermittent des inducteurs et à mesurer la tension disruptive dans le circuit en parallèle avec l'effluve.

En amont de l'éclateur est intercalé un microampèremètre blindé par un cylindre de Faraday et protégé suivant les détails de la figure 20 par un parafoudre shunté par trois condensateurs d'une capacité d'environ 30 unités électrostatiques montés en cascade avec trois résistances de 700 000  $\Omega$  chacune, où les chutes de tension sont négligeables devant les tensions mesurées, puisque, en régime continu, ces chutes sont inférieures à

$$100 \times 10^{-6} \text{ A} \times 2 \times 10^6 \Omega = 200 \text{ V.}$$

Un doigt de commande avait été prévu pour mettre en court-circuit éventuellement le parafoudre. Mais cette précaution a été reconnue inutile tant pour la protection de l'appareil que pour le rechargement des inducteurs. A part les fuites aux bornes mêmes de la génératrice, toutes deux isolées de la terre, les autres fuites du circuit extérieur n'échappent pas aux mesures.

**A. Première série de mesures.** — Ces mesures ont été exécutées au Laboratoire de Physique industrielle de la Faculté des Sciences d'Alger à la température de 18° C à 19° C.

Pour mesurer le courant en fonction de la tension, à vitesse constante, on règle l'éclateur à sphères de 50 mm de diamètre avec une jauge donnant la tension disruptive d'après la courbe établie à partir des potentiels disruptifs déterminés par Abraham et Villard. La génératrice était entraînée par courroie avec un moteur shunt à courant continu. La tension de la génératrice dépend de la longueur de l'effluve. En écartant en conséquence les sphères d'effluvation, on fait croître

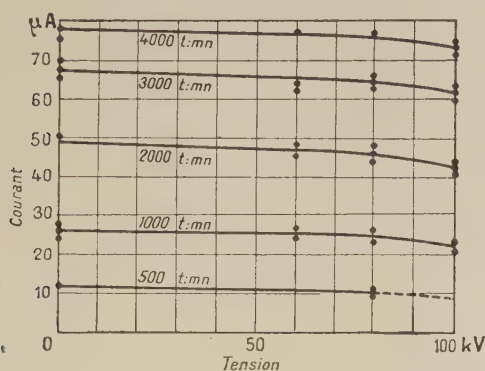


Fig. 21. — Caractéristiques du courant en fonction de la tension à vitesse constante.

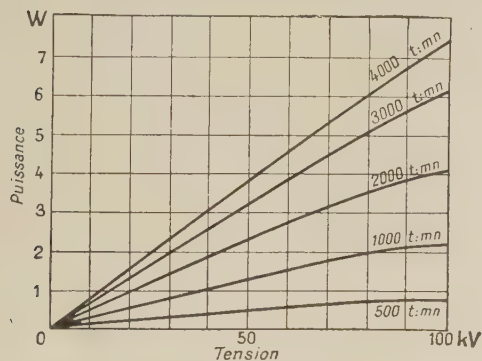


Fig. 22. — Caractéristiques de la puissance en fonction de la tension à vitesse constante.

la tension pour avoir des étincelles à l'éclateur, ce qui recharge les inducteurs. Puis, on diminue progressivement la longueur de l'effluve pour faire tout juste cesser les décharges,

afin que la tension soit très voisine de la tension disruptive. C'est à ce moment qu'il convient de noter l'intensité du courant, la vitesse étant contrôlée.

La conduite des opérations est différente lorsque la tension disruptive choisie est insuffisante pour recharger complètement les inducteurs. Dans ce cas, on commence par régler l'éclateur à une tension disruptive élevée, à 70 kV ou davantage, et on recharge les inducteurs en marche avec les étincelles éclatant pour ce réglage. La génératrice continuant à débiter, on fait cesser ces étincelles en diminuant considérablement l'effluve, puis on règle à la jauge l'éclateur à la tension disruptive choisie. Il ne reste plus qu'à noter le courant au moment où la tension de la génératrice est remontée jusqu'à la tension disruptive par allongement progressif de l'effluve par l'opérateur, la vitesse étant contrôlée (1).

Enfin, les opérations se simplifient lorsqu'il s'agit de mesurer le courant de court-circuit : après avoir rechargé les inducteurs par des étincelles sous tension élevée, il suffit d'amener en contact l'un avec l'autre les conducteurs à effluve, sans avoir besoin de toucher à l'éclateur.

Les résultats donnés dans le tableau I sont traduits sur la figure 21 par les cinq courbes relatives aux vitesses : 500 t : mn ; 2 000 t : mn ; 3 000 t : mn ; 4 000 t : mn. La vitesse de 5 000 t : mn causait trop de vibrations.

Les courbes dites « caractéristiques » de la figure 21 servent à établir d'autres graphiques.

Ainsi, à chaque tension, pour une vitesse donnée, on peut faire correspondre le produit de cette tension par le courant repéré sur la caractéristique, produit qui est la puissance électrique disponible aux bornes de la génératrice. Les cinq courbes de la figure 22 sont tracées de cette façon. Les puissances en watts sont portées en ordonnées et les tensions en kilovolts sont portées en abscisses. Chaque courbe correspond à une vitesse.

En procédant autrement, on peut repérer, pour chaque caractéristique de la figure 21, c'est-à-dire pour chaque vitesse, le courant de court-circuit et le courant sous 100 kV, ce qui permet de construire les deux courbes de la figure 23 donnant ces deux courants en fonction de la vitesse.

Enfin, le graphique de la figure 23 sert à son tour pour calculer, à chaque vitesse, le quotient de la portion d'ordonnée comprise entre les deux courbes, par la plus grande ordonnée ; quotient qui représente la chute relative de courant lorsque la tension s'élève de 0 à 100 kV, d'où le graphique de la figure 25 donnant cette chute en fonction de la vitesse de rotation.

## B. Considérations relatives à la première série de mesures.

— 1. STABILITÉ DU POINT DE FONCTIONNEMENT. — Le point de fonctionnement ( $U$ ,  $I$ ) est déterminé par la rencontre de la caractéristique de la génératrice tournant à vitesse voulue, avec une autre caractéristique : celle de l'effluve qui dépend, entre autres facteurs, de l'écartement des conducteurs. L'allure bien connue, d'origine expérimentale, de toute caractéristique d'effluve, tend, comme on le voit sur la figure 26 à favoriser une intersection orthogonale qui explique la stabilité remarquable du point de fonctionnement.

2. INEXISTENCE DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE. — Suivant la figure 26, l'extrapolation de la caractéristique sensiblement

(1) La vitesse est mesurée avec un « stroboméca ». Cet appareil, tenu à distance, permet d'observer la génératrice à travers une fente fixe périodiquement en concordance avec une ou plusieurs fentes du disque tournant de l'appareil. D'où un rapport déterminé entre la vitesse de ce disque connue par repérage sur la graduation (contrôlée elle-même par étalonnage antérieur) et la vitesse de la génératrice lorsque, par effet stroboscopique, on constate l'immobilité d'un repère tracé sur la poulie.

rectiligne de la génératrice jusqu'à la rencontre en E de l'axe des abscisses peut faire assimiler cette caractéristique avec celle d'une pile ou d'un générateur électromagnétique

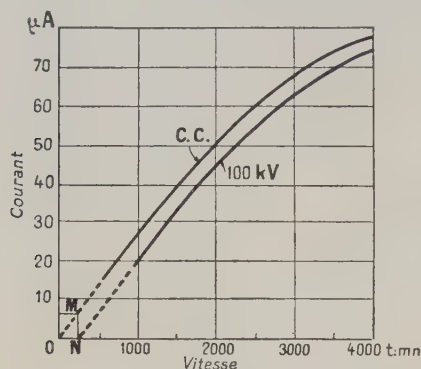


Fig. 23. — Caractéristiques du courant de court-circuit et courant sous 100 kV en fonction de la vitesse angulaire.

pourvu d'une grande force électromotrice  $E$  et d'une énorme résistance intérieure

$$\rho = \frac{E}{I_{cc}}$$

Si l'on adoptait ce point de vue, la tension  $U$  varierait bien, en effet (entre 0 et une limite inférieure à  $E$ ), selon la loi connue

$$U = E - \rho I$$

Mais ce point de vue conduit à une contradiction.

En effet, si la machine avait réellement une force électromotrice  $E$ , il y aurait transformation d'énergie mécanique

en énergie électrique de puissance  $EI$ , puissance qui devrait croître en même temps que  $I$ . En particulier, elle devrait être maximum en court-circuit. Or l'expérience montre que le couple à exercer sur la poulie, notable lorsque  $U$  est élevé, diminue en même temps que  $U$ , c'est-à-dire en même temps que  $I$  augmente, jusqu'au court-circuit. Cette contradiction fondamentale suffit pour affirmer que la notion de force électromotrice n'est pas applicable aux machines électrostatiques ou, si l'on veut, que ces machines sont dépourvues de force électromotrice [13].

Ainsi disparaît la nécessité théorique de l'existence de prétendues pertes internes dues à l'énormité de  $\rho$  que l'on croyait pouvoir comparer à la résistance interne des machines électromagnétiques.

La négation de l'existence de la force électromotrice dans les machines statiques concorde ainsi avec l'opinion de H. Chaumat qui a montré, dès 1929, que les chutes de tension internes ne s'y produisaient pas [14].

Cette négation cesse d'être choquante si l'on remarque que la grandeur des tensions obtenues résulte précisément de ce que la tension n'y est plus soumise à une cause interne

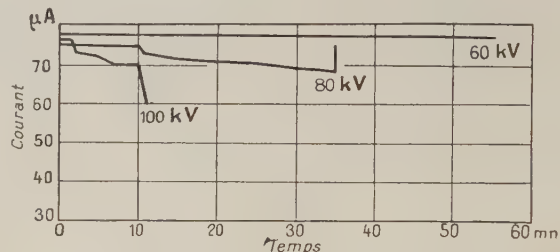


Fig. 24. — Caractéristiques du fonctionnement sans étincelle à la vitesse de 4 000 t. mn. Courant en fonction du temps.

TABLEAU I. — Valeurs du courant en microampères sous diverses tensions, à vitesse constante.

| t : mn      | 0 volt |      |      |      | 60 kV |      | 80 kV |      |      |    | 100 kV |      |            |    |
|-------------|--------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|----|--------|------|------------|----|
| 4 000 ..... | 73,5   | 77,5 | 77,5 |      | 77,5  |      | 77,5  | 77,5 |      |    | 71,5   | 73,5 | 76,5       |    |
| 3 000 ..... | 66     | 67   | 66   | 70   | 64    | 62,7 | 66    | 65   | 64   |    | 61,6   | 59,6 | 62,7       |    |
| 2 000 ..... | 50     |      |      |      | 47,3  | 45,1 | 44    | 45   | 46   | 44 | 40,8   | 41,2 | 41,9       | 43 |
| 1 000 ..... | 24,2   | 26,3 | 25,8 | 27,3 | 24,6  | 25,2 | 23,6  | 23,6 | 24,2 |    | 23,6   | 21   | baisse     |    |
| 500 .....   | 12,5   |      |      |      |       |      | 10,4  | 9,9  |      |    |        |      | impossible |    |

TABLEAU II. — Variation du courant pendant la marche sans étincelle à 4 000 tours par minute (température ambiante : 18 à 19 degrés Celsius).

| U = 60 kV          |      |      |      |            |            |      |      |      |      |      |      |           |
|--------------------|------|------|------|------------|------------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| minutes .....      | 0    | 4    | 10   | 15         | 20         | 25   | 30   | 35   | 40   | 45   | 50   | 55        |
| microampères ..... | 77,6 | 77,3 | 77,3 | 77,3       | 77,3       | 76,9 | 76,6 | 76,7 | 76,7 | 76,6 | 76,6 | 76,6      |
| U = 80 kV          |      |      |      |            |            |      |      |      |      |      |      |           |
| minutes .....      | 0    | 5    | 8    | 10         | 11         | 13   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   |           |
| microampères ..... | 75,6 | 75,6 | 75,2 | 75,2       | 72,0 chute | 70,6 | 70,0 | 70,0 | 69,4 | 68,6 | 68,2 | étincelle |
| U = 100 kV         |      |      |      |            |            |      |      |      |      |      |      |           |
| minutes .....      | 0    | 1    | 2    | 3          | 4          | 5    | 7    | 9    | 10   |      |      |           |
| microampères ..... | 76,6 | 76,6 | 76,1 | 72,6 chute | 72,3       | 71,8 | 69,5 | 68,9 | 68,9 |      |      | chute     |

de limitation, sauf la production d'effluves ou de décharges disruptives. A champ excitateur constant créé par la charge de l'inducteur, ce n'est pas la tension mais le débit qui est limité ; il doit nécessairement passer dans le circuit externe.

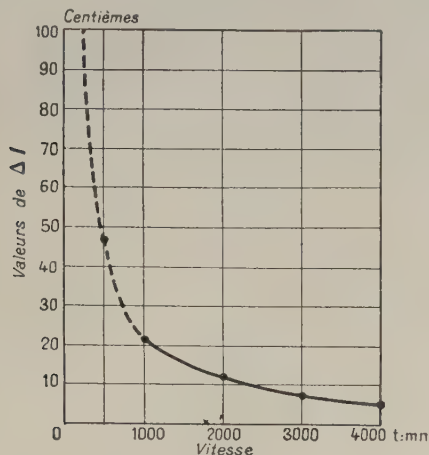


Fig. 25. — Courbe de la chute relative du courant entre zéro et 100 kV en fonction de la vitesse angulaire.

Ici, le phénomène fondamental est la convection des charges sur le plateau ; la tension en dépend, compte tenu de l'opposition du circuit externe, tension qui peut varier considérablement sans pour cela entraîner de notables pertes de puissance dans la génératrice.

3. NON PROPORTIONNALITÉ ENTRE LE COURANT ET LA VITESSE. — Sous tension constante de la génératrice, l'invariabilité de la charge des inducteurs entraîne l'invariabilité du champ excitateur dans l'entreverre en face de chaque peigne. Si la densité des charges véhiculées sur le plateau ne dépendait que de ce champ excitateur, elle devrait être indépendante de la vitesse du plateau, de sorte que les courants de convection dus au transport des dites charges du plateau devraient être rigoureusement proportionnels à cette vitesse.

La somme  $I'$  des courants de convection est liée au courant  $I$  fourni, par la relation

$$I = I' - f(U),$$

$U$  étant la tension de la génératrice et  $f(U)$  une fonction qui doit avoir la dimension d'un courant, dont la forme peut par exemple s'apparenter à  $U/r$  et qui représente la somme des courants de fuite dans la génératrice. Par conséquent, sous tension constante, si  $I'$  était proportionnel à la vitesse,  $I$  devrait varier linéairement en fonction de la vitesse.

Or le graphique de la figure 23 montre qu'il n'en est pas ainsi, ni à 100 kV, ni en court-circuit, le sens de la courbure des lignes du graphique correspondant à une diminution de la densité des charges sur le plateau au fur et à mesure que la vitesse augmente.

L'explication de cette diminution de densité est la suivante :

Les charges déposées sur le plateau proviennent du transfert de charges entre la surface du plateau et les pointes du

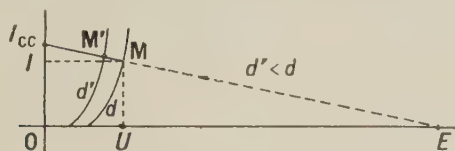


Fig. 26. — Caractéristique de la génératrice, extrapolée en trait interrompu. Caractéristiques d'effluves  $d$  et  $d'$  et points de fonctionnement  $MM'$ .

peigne. Ce transfert, qui nécessite une ionisation locale de l'air, se fait plus ou moins difficilement sous forme de petits effluves aux pointes du peigne, qui ne touchent pas le plateau (ces petits effluves existent même dans le cas où la pointe touche le plateau).

Pour un champ excitateur donné dans l'entreverre, la charge prise par l'unité de surface du plateau en face des pointes sera d'autant plus faible que ces effluves nécessiteront un champ local plus intense dans l'air près de la surface peignée du plateau, dit champ de transfert. Dans le cas où ce champ et le champ excitateur peuvent tous deux être considérés comme normaux au plan du plateau, on peut même avancer, en s'appuyant sur le théorème de Maxwell sur le flux d'induction, que la densité des charges est proportionnelle à la différence entre ces deux champs [8].

Or l'augmentation de la vitesse du plateau, en provoquant l'accroissement du débit de chaque effluve élémentaire entraîne l'accroissement du champ de transfert en vertu de ce que pour tout effluve la dérivée  $du/di$  reste positive ( $i$  étant l'intensité du courant d'effluve et  $u$  la différence de potentiel entre les extrémités de l'effluve). Par conséquent, d'après ce qui vient d'être dit, il est normal que la densité des charges sur le plateau diminue lorsque la vitesse augmente.

4. LA RÉACTION DE TENSION. — Lorsque, pour une vitesse donnée, la tension  $U$  s'élève de 0 à 100 kV, la chute relative du courant est d'autant plus faible que la vitesse considérée est plus grande, selon le graphique de la figure 25. Cela s'explique aisément.

Lorsque la tension s'élève de 0 à  $U$ , la diminution  $\Delta I$  de  $I$  est

$$\Delta I = f(U)$$

si l'on admet que  $f(0) = 0$  et que  $I'$  est indépendant de  $U$ .

Dans ces conditions, pour  $U$  donné, la chute relative  $\Delta I/I_{cc}$  diminue bien quand  $I_{cc}$  augmente, c'est-à-dire quand on considère des vitesses de plus en plus élevées.

C'est ainsi que d'après l'extrapolation faite sur le graphique de la figure 23 la vitesse de 250 t : mn au point N doit correspondre à un courant nul sous 100 kV, un courant NM de 6  $\mu A$  à tension nulle, de sorte que  $f(100 \text{ kV}) = 6 \mu A$  et que la chute relative, de 100 pour 100 à cette vitesse, devrait être 6/78 soit 7,7 pour 100 à 4 000 t : mn, si la chute de courant était uniquement imputable aux fuites. En réalité, comme l'indique le graphique figure 25, la chute relative à 4 000 t : mn n'est que de 6 pour 100.

Donc, la chute absolue  $\Delta I$  de  $I$  entre 0 et 100 kV subit elle-même une diminution lorsqu'on considère la vitesse de 4 000 t : mn au lieu de la vitesse 250 t : mn.

Pour expliquer cette diminution, assez faible il est vrai ici, mais plus importante dans d'autres machines, on est conduit à considérer que le courant de convection  $I'$  n'est pas complètement indépendant de  $U$ , de sorte que

$$\Delta I = f(U) + \Delta I'.$$

C'est en cette diminution  $\Delta I'$  du courant de convection que réside la réaction dite de tension [15].

Un faisceau de nombreuses expériences que j'ai faites antérieurement sur une génératrice à changements de liaisons et qui font intervenir tant la nature du gaz que sa pression ainsi que la forme des peignes, m'ont amené à dire que les choses se passent comme si le champ de transfert s'accroissait en même temps que la tension — pour une vitesse donnée — parce que les éléments du plateau voisins du peigne ne sont pas entièrement protégés par l'inducteur contre l'influence perturbatrice de la tension entre les organes de polarité

opposée, comme lorsqu'il s'agit de capacités parasites dans les rotors à transporteurs conducteurs.

Ces expériences m'ont, d'autre part, montré que cette perturbation était d'autant plus importante que le champ de transfert était plus faible. C'est notamment le cas du gaz carbonique qui donne des courants élevés, non à cause d'un grand champ excitateur, mais par suite d'un faible champ de transfert et où la réaction de tension est proportionnellement plus grande que dans l'air. C'est aussi le cas des peignes à lame.

Inversement, un champ de transfert élevé s'accroît difficilement par réaction de tension. D'après l'explication donnée de la non-proportionnalité entre courant et vitesse, la vitesse élevée s'accompagne d'un champ de transfert élevé, donc peu sujet à croître par réaction de tension. D'où la possibilité d'avoir, à vitesse élevée, une faible variation de champ de transfert et consécutivement une faible diminution du courant de convection, une chute absolue du courant fourni plus faible qu'à faible vitesse de rotation, lorsque la tension s'élève de 0 à 100 kV, en est la conséquence.

**C. Deuxième série de mesures.** — Il s'agit de la variation du courant en fonction de la durée de fonctionnement sans décharge à l'éclateur, sous tension sensiblement constante, à la vitesse de 4 000 t : mn. Les résultats donnés dans le tableau II sont traduits par les trois courbes de la figure 24 relatives aux tensions de 60, 80 et 100 kV.

A l'aide de chaque courbe du graphique de la figure 24, on peut retrouver la diminution du courant pendant un temps déterminé, par exemple 10 mn de fonctionnement sans étincelle. Les trois courbes donnent ainsi trois points qui servent à tracer la courbe du graphique fig. 27 donnant la diminution relative du courant pendant 10 mn de fonctionnement à la tension choisie. Une seconde courbe a été approximativement établie pour une durée de fonctionnement de 30 mn.

**En résumé :** on voit que la puissance sous 100 kV peut dépasser 5 W à 3 000 t : mn et 7 W à 4 000 t : mn, avec plus de 70  $\mu$ A à cette dernière vitesse, le débit est presque indépendant de la tension, ce qui est une particularité intéressante

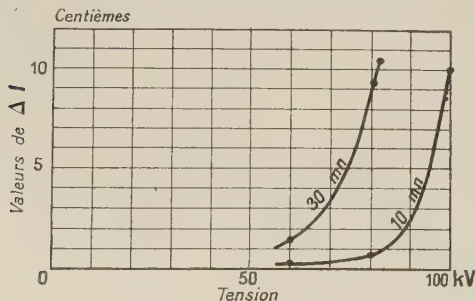


Fig. 27. — Courbes montrant la diminution relative du courant en 10 mn et en 30 mn, en fonction de la tension, à la vitesse de 4 000 t : mn.

à signaler pour la charge rapide des condensateurs destinés par exemple à la production d'ondes de choc.

L'affaiblissement du courant entre les instants de deux étincelles est assez rapide sous 100 kV, mais il devient acceptable pour certaines applications sous 80 kV ou 60 kV.

**D. Entraînement par moteur à couple constant.** — On peut faire une approximation qui consiste à regarder le courant  $I$  de la génératrice comme sensiblement proportionnel

à la vitesse du plateau, tant que la charge des inducteurs ne varie pas. Ceci étant admis,  $I$  sera aussi proportionnel à la vitesse  $N$  du moteur d'entraînement, lorsque le choix des poulies sera fixé. On a

$$I = K.N$$

$K$  étant une constante qui dépend de la charge des inducteurs. Soit  $C$  le couple du moteur et soit  $q$  le rendement global de la génératrice avec l'entraînement, la puissance sur la poulie du moteur sera

$$2\pi NC = \frac{IU}{q} = \frac{KNU}{q},$$

d'où

$$KU = 2\pi q C.$$

La tension  $U$  est donc déterminée par le produit  $qC$ , tant que les inducteurs gardent leur charge invariable. D'où un moyen d'avoir une tension constante indépendamment du débit si  $C$  est inversement proportionnel à  $q$ . Le rendement  $q$  devant décroître lorsque la vitesse augmente par suite de la prépondérance des pertes par frottement de l'air, il faut donc un moteur dont le couple croît en même temps que la vitesse.

Cependant, la prolongation de la durée de fonctionnement sans étincelle va s'accompagner d'une diminution de la charge des inducteurs, de sorte que le facteur  $K$  devient  $K'$  et, dans le cas où  $qC$  ne varie pas, la nouvelle tension  $U'$  devient telle que

$$K'U' = KU.$$

Or, la charge des inducteurs ayant diminué, le courant  $I$  doit diminuer pour une vitesse donnée  $N$ , c'est-à-dire que  $K' < K$ . Donc,  $U'$  doit être supérieur à  $U$  et on arrive à cette conclusion d'apparence paradoxale que l'affaiblissement de la charge des inducteurs doit, dans ces conditions, faire croître la tension.

Un tel accroissement a été constaté dans des conditions même moins favorables où la génératrice était entraînée par un moteur de petit ventilateur à collecteur, à inducteurs série, alimenté sous 100 V et 50 Hz et fournissant à l'arrêt un couple de 240 g-cm.

Pour un rapport 1/1 des diamètres des poulies, la génératrice arrivait tout juste à fournir des étincelles de 80 kV. J'ai alors réglé l'éclateur à 90 kV pour faire cesser les étincelles. La vitesse du moteur, initialement très faible (quelques tours par seconde) a progressivement augmenté et au bout d'un temps de quelques minutes à dix minutes, une ou plusieurs étincelles se sont produites à 90 kV, puis ont cessé aussitôt, le moteur ralentissant.

De nouveau, la vitesse a augmenté et la tension disruptive de 90 kV a été encore atteinte au bout d'un temps voisin de celui déjà indiqué, et ainsi de suite pendant plusieurs heures.

Cette disposition est donc indiquée pour obtenir automatiquement le rechargement des inducteurs avec le minimum d'étincelles. Pour que l'expérience réussisse il ne faut pas que l'éclateur ait une trop faible capacité, faute de quoi le moteur n'a pas le temps de ralentir et les étincelles ne cessent plus.

**Remarque.** — Si le couple résistant de la génératrice était encore égal à 240 g-cm à la vitesse de 1 000 t : mn par exemple, c'est-à-dire si l'on pouvait négliger la résistance de l'air sur le plateau, la puissance mécanique fournie serait

$$1,027 \times 10^{-5} \times 240 \times 1000 = 2,46 \text{ W},$$

pour une puissance électrique obtenue de plus de 2 W repérée sur le graphique de la figure 22 à la tension de 90 kV, soit un rendement de

$$\frac{2}{2,46} = \frac{82}{100}.$$

**E. Réversibilité de la machine.** — De prime abord, la machine semble irréversible parce que le couple dû aux forces électrostatiques ne peut même pas faire accomplir un demi-tour en arrière lorsqu'on lâche la poulie au moment où les condensateurs de l'éclateur sont chargés. La rotation ne peut pas continuer davantage si l'on connecte la machine à une source de même polarité. Ce cas s'explique aisément.

Reportons-nous à la figure 28 : supposons les inducteurs chargés de façon que, en génératrice, l'inducteur  $I$  soit à la borne  $+$  et l'inducteur  $I'$  à la borne  $-$ . La figure indique les

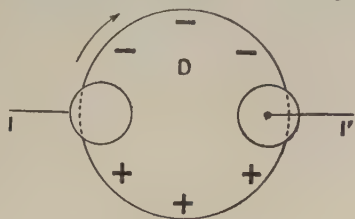


Fig. 28. — Croquis relatif à la réversibilité de la machine électrostatique.

plages chargées du plateau lorsque celui-ci tourne dans le sens de la flèche.

1. **PREMIER CAS.** — Arrêtons le plateau et appliquons une tension  $I +$ ,  $I' -$  à l'aide d'une source. Les plages étant chargées comme il est indiqué par suite d'une rotation antérieure dans le sens de la flèche, le couple dû aux forces électrostatiques va s'exercer en sens inverse. Lorsque le plateau commence à tourner pour céder à l'action de ce couple, la plage supérieure commence à être chargée positivement à partir de  $I'$ , tandis que la plage inférieure commence à être chargée négativement à partir de  $I$ . La répartition indiquée sur la figure est donc détruite et le couple va cesser avant que le plateau ait fait un demi-tour en sens inverse de la flèche.

2. **DEUXIÈME CAS.** — Considérons de nouveau la machine ayant tourné en génératrice dans le sens de la flèche ; arrêtons le plateau et appliquons cette fois une tension  $I -$ ,  $I' +$ . Les plages étant chargées initialement de la même façon que dans le premier cas, le couple dû aux forces électrostatiques va s'exercer dans le sens de la flèche. La rotation du plateau dans ce sens sous l'action de ce couple ne modifie pas la répartition des charges, donc la rotation doit continuer.

L'expérience le confirme : pour constater la réversibilité il faut une source de polarité opposée à celle de la génératrice.

Seulement, les inducteurs préalablement chargés vont se décharger progressivement au cours de la marche en moteur

comme dans le cas de la marche en génératrice et si l'on veut alors les recharger par étincelles à l'éclateur, les inducteurs prennent des charges qui rendent la machine apte à être génératrice avec la polarité de la source, donc inapte à être motrice car on retombe sur le premier cas envisagé.

On en déduit que le schéma (A) ne convient pas pour un moteur dont on veut recharger les inducteurs par des étincelles fournies avec une alimentation à polarité invariable.

Par contre, le schéma (B), qui ne permet pas de conserver la polarité en génératrice, doit convenir au moteur alimenté dans les conditions précitées.

Ceci est confirmé par l'expérience : en associant une génératrice de schéma (A) à un moteur de schéma (B), les étincelles rechargent simultanément dans des sens convenables les inducteurs des deux machines pour que l'ensemble se maintienne en fonctionnement sous une polarité invariable, selon la figure 29.

L'expérience réussit même en tournant à la main la poulie de la génératrice. Il est d'ailleurs curieux de voir tourner les deux machines sensiblement à la même vitesse.

Bien plus, on peut inverser le sens de l'une des machines sans inverser le sens de l'autre, comme on peut inverser à la fois ces deux sens de rotation, le moteur exigeant toutefois un lancement pour changer de sens.

Enfin, on peut pousser l'expérience encore plus loin en entraînant la machine du schéma (B) qui devient génératrice à polarité changeante, tandis que la machine de schéma (A) devient motrice à polarité changeante, de sorte que chaque

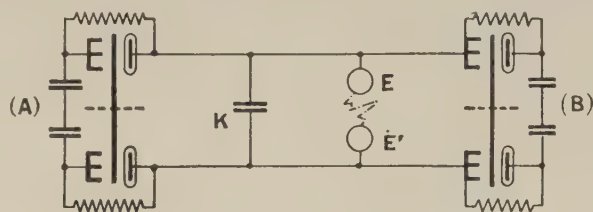


Fig. 29. — Schéma relatif à l'association entre machine génératrice et machine motrice.

étincelle change simultanément les polarités des deux machines qui continuent à s'accorder, quels que soient leurs sens de rotation.

Ainsi, les inducteurs indirectement chargés par ionisation à l'aide d'étincelles peuvent se prêter à la réalisation de nouveaux moteurs électrostatiques qui s'ajoutent aux divers types déjà connus [6], [16], [17].

## Conclusions

J'ai apporté une solution au problème posé de la recharge par ionisation des inducteurs à couche isolante dans des génératrices électrostatiques à influence dépourvues de connexions déplaçables.

Cette solution, basée sur les connexions permanentes de résistances entre les organes en regard l'un de l'autre, peignes et inducteurs, aboutit à la simplicité recherchée du montage tout en autorisant la simplification des inducteurs eux-mêmes (suppression de la couche à haute résistivité).

Le fonctionnement est inséparable de la production intermittente d'étincelles (ou de courts-circuits) nécessaires à la recharge indirecte des inducteurs.

Le choix du schéma permet d'obtenir soit une polarité invariable, soit le changement de la polarité à chaque étincelle.

L'expérience confirme la grande marge prévue pour le choix

de la valeur des résistances, compte tenu des diverses capacités, et permet de vérifier diverses considérations théoriques.

Les résultats obtenus avec un modèle de génératrice montrent qu'il est possible de construire des machines simples et maniables qui, même en fonctionnant dans l'air à la pression atmosphérique, sont intéressantes pour obtenir commodément l'énergie électrique sous haute tension continue.

Du comportement de la génératrice on peut, d'autre part, conclure que :

1° Les machines électrostatiques n'ont pas de force électromotrice.

2° Le courant d'une machine à plateau à excitation constante n'est pas une fonction linéaire de la vitesse de rotation.

L'association de deux machines permet de faire de curieuses expériences touchant leur réversibilité.

## Appendice

### I. Sur la possibilité de minimiser la perturbation apportée par la génératrice à la décharge à l'éclateur.

— Ainsi qu'il est indiqué au paragraphe II de la première partie, l'éclateur est muni d'un condensateur, de sorte que sa capacité totale  $K$ , est importante par rapport aux capacités qui interviennent dans la génératrice. Dans ces conditions, la décharge à l'éclateur, mettant en jeu une puissance considérable, impose un régime forcé de tension entre les bornes de la génératrice. On peut d'ailleurs le montrer de la façon suivante, en se basant sur des conditions expérimentales couramment réalisées :

Si  $r$  désigne la moitié de la résistance  $\rho$  de l'étincelle, résistance supposée constante et si  $Z$  désigne le double de la capacité  $K$ , pour se conformer au schéma de la figure 2 qui représente la moitié de la génératrice et de l'éclateur, les ordres de grandeur sont par exemple les suivantes :

$$\frac{R}{r} > 20\,000, \quad \frac{Z}{C} = 10, \quad \frac{C}{M} = 10.$$

En désignant par  $y$  et par  $u$  les tensions instantanées respectivement entre E, F et entre I, P, on a pendant la décharge

$$C y' - (C + M) u' - \frac{u}{R} = 0, \quad (1)$$

$$(C + Z) y' - C u' + \frac{y}{r} = 0, \quad (2)$$

$$y'' \left[ 1 - \frac{C^2}{(C + M)(C + Z)} \right] + y' \left[ \frac{1}{r(C + Z)} + \frac{1}{R(C + M)} \right] + \frac{y}{Rr(C + M)(C + Z)} = 0. \quad (3)$$

Les conditions initiales au temps  $\theta = 0$  sont

$$y_0 = \frac{U}{2}, \quad u_0 = 0.$$

Dans l'équation (3), le coefficient de  $y'$  est la somme de deux termes dont le rapport est inférieur à 0,001, de sorte qu'on peut négliger le plus petit de ces termes devant le plus grand et simplifier l'équation qui devient

$$y'' R r [C(Z + M) + M Z] + y'(C + M) + y = 0. \quad (4)$$

Dans la somme  $(Z + M)$ , le rapport des termes étant de l'ordre du centième, on conserve une approximation suffi-

sante en négligeant  $M$  devant  $Z$ , de sorte que l'équation se simplifie encore et devient

$$Z r y'' + y' + \frac{y}{R(C + M)} = 0. \quad (5)$$

En continuant à tenir compte des conditions expérimentales précitées on démontre que dans la solution de l'équation (5)

$$y = H e^{g\theta} + h e^{g'\theta},$$

$H$  et  $G$  tendent respectivement vers  $U/2$  et  $-1/Zr$ , tandis que  $g$  est deux mille fois plus petit que  $G$  et que  $h$  est également une infime fraction de  $H$ , la seconde exponentielle correspondant à une très grande constante de temps.

Comme  $Zr = K\rho$ , la solution tend bien à conserver la forme

$$y = \frac{U}{2} e^{-\frac{\theta}{K\rho}},$$

qui régit la tension à l'éclateur lorsque celui-ci se décharge sans être relié à la génératrice.

### II. Sur l'établissement de la loi de variation de la tension $u$ entre le peigne et l'armature inductrice.

— D'après le paragraphe I de cet appendice et en se reportant à la figure 2, on voit que la décharge à l'éclateur muni de sa capacité  $K$  impose un régime forcé tel que la tension entre E et F suit la loi

$$y = \frac{U}{2} e^{-\frac{\theta}{t}},$$

en fonction du temps  $\theta$ , la constante de temps  $t$  étant égale à  $K\rho$  en supposant constante la résistance  $\rho$  de l'étincelle.

Tant que l'ionisation ne se produit pas dans l'entreverre, l'équation (1) du paragraphe I du présent appendice subsiste et donne

$$u' + \frac{u}{R(C + M)} = \frac{C}{C + M} y' = -\frac{1}{t} \cdot \frac{C}{C + M} \frac{U}{2} e^{-\frac{\theta}{t}},$$

équation différentielle qui s'écrit

$$u' + \frac{u}{T} = -\frac{U}{2} \cdot \frac{T'}{Tt} e^{-\frac{\theta}{t}} \quad (6)$$

si l'on pose

$$R(M + C) = T, \quad RC = T'$$

et dont la solution est indiquée en page 28. — P. J.

## Bibliographie

[1] Selon les vues, si suggestives, exprimées par G. Darrieus ; Le théorème de Poynting en électrotechnique. *Bulletin de la Société française des Electriciens*, septembre 1936.

[2] H. FÉLICI ; Machines électrostatiques puissantes. *Le Journal de Physique et le Radium*, janvier 1947, t. 8, p. 1-7 et février 1948, t. 9, p. 66-80.

[3] P. JOLIVET ; Génératrice électrostatique auto-excitatrice à charges résiduelles à polarités invariables ou non, à volonté. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 9 octobre 1933, t. 197, p. 744.

[4] P. JOLIVET ; Génératrices électrostatiques. *Revue générale de l'Électricité*, 17 novembre 1934, t. 36, p. 698-701.

[5] P. JOLIVET; Les machines électrostatiques à influence et la rénovation de leur technique. *Revue générale de l'Electricité*, juin 1947, t. 56, p. 243-255.

[6] H. CHAUMAT; Génératrices et moteurs électrostatiques. *Bulletin de la Société française des Electriciens*, septembre 1933, t. 5, 5<sup>e</sup> série, p. 907-929.

[7] John GRAY; *Les machines électriques à influence*, traduit par G. PELLISSIER, édité par la librairie Gauthier-Villars, à Paris, édition 1892.

[8] P. JOLIVET; Les champs électriques dans les génératrices électrostatiques à inducteurs chargés par ionisation. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 1945, t. 221, p. 613.

[9] V. CRÉMIEUX et H. PENDER; Recherches contradictoires sur l'effet magnétique de la convention électrique. *Journal de Physique*, 1903, t. II, 4<sup>e</sup> série, p. 641.

[10] MALCLES; Thèse, Paris 1903.

[11] P. JOLIVET; Nouvelle génératrice électrostatique à influence. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 1947, t. 225, p. 117.

[12] P. JOLIVET; Forces électrostatiques critiques dans quelques milieux gazeux. *Revue générale de l'Electricité*, septembre 1949, t. 58, p. 383-388.

[13] P. JOLIVET; Sur la recherche de la force électromotrice des machines électrostatiques. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 1945, t. 221, p. 347.

[14] H. CHAUMAT; Comparaison entre les machines électrostatiques et les dynamos. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 1929, t. 188, p. 1232-1234.

[15] P. JOLIVET; La réaction de tension dans les machines électrostatiques. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 1945, t. 221, p. 693.

[16] P. JOLIVET; Nouveau moteur électrostatique. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 1936, t. 202, p. 1030.

[17] P. JOLIVET; Sur une cause de la faiblesse de puissance des machines électrostatiques et un moyen d'y remédier. *Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 1936, t. 202, p. 2051.





## DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITION DONNÉE PAR LA FACULTÉ

---

### Les isolants électriques nouveaux

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

Alger, le 27 mai 1952.

*Le Recteur de l'Académie d'Alger,*

P.-E. GAU.

VU ET APPROUVÉ :

*Le Doyen de la Faculté des Sciences,*

L. ROYER.



## TABLE DES MATIÈRES

### PREMIÈRE THÈSE : Sur une nouvelle machine électrostatique à influence.

|                                                                                                                                                                   | Pages. |                                                                                       | Pages. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Introduction .....                                                                                                                                                | 5      | II. Description des organes utilisés .....                                            | 16     |
| PREMIÈRE PARTIE : Particularités de fonctionnement<br>des machines à inducteurs recouverts d'isolant .....                                                        | 6      | A. Plateau rotatif .....                                                              | 16     |
| I. Nouvelle classification des génératrices à<br>influence .....                                                                                                  | 6      | B. Peignes .....                                                                      | 16     |
| A. Premier groupe .....                                                                                                                                           | 6      | C. Inducteurs .....                                                                   | 16     |
| B. Deuxième groupe .....                                                                                                                                          | 6      | D. Résistances R et R' .....                                                          | 16     |
| C. Troisième groupe .....                                                                                                                                         | 7      | E. Condensateurs C et C' .....                                                        | 16     |
| II. Anomalies dues à l'isolant recouvrant l'induc-<br>teur .....                                                                                                  | 7      | F. Eclateurs .....                                                                    | 16     |
| DEUXIÈME PARTIE : Procédé assurant sans change-<br>ment de connexions le rechargement par ionisation<br>des inducteurs d'une génératrice à double transport. .... | 9      | III. Expérimentation .....                                                            | 16     |
| I. Introduction .....                                                                                                                                             | 9      | A. Observation faites dans l'obscurité .....                                          | 17     |
| II. Fonctionnement : analyse préliminaire .....                                                                                                                   | 9      | B. Choix des résistances R et R' .....                                                | 17     |
| III. Fonctionnement : Théorie développée .....                                                                                                                    | 11     | C. Intervention des capacités des condensa-<br>teurs C et C' .....                    | 17     |
| A. Amorçage par étincelle. Première étincelle<br>à l'éclateur .....                                                                                               | 11     | D. Observations particulières .....                                                   | 18     |
| B. Rôle du mouvement du plateau pendant<br>l'étincelle .....                                                                                                      | 12     | IV. Expérimentation du montage à polarité chan-<br>geante .....                       | 18     |
| C. Cas de plusieurs étincelles .....                                                                                                                              | 13     | A. Montage utilisé .....                                                              | 18     |
| D. Effet de la deuxième étincelle .....                                                                                                                           | 13     | B. Expérimentation .....                                                              | 18     |
| E. Généralisation. Effet de la n <sup>e</sup> étincelle .....                                                                                                     | 13     | QUATRIÈME PARTIE : Application à une nouvelle<br>génératrice. Résultats obtenus ..... | 19     |
| F. Étincelles dans le cas du schéma à polarité<br>changeante .....                                                                                                | 14     | I. Description .....                                                                  | 19     |
| G. Rôle des diélectriques et des résistances<br>dans l'ionisation secondaire .....                                                                                | 15     | II. Fonctionnement .....                                                              | 19     |
| TROISIÈME PARTIE : Expérimentation du nouveau<br>procédé de recharge des inducteurs.<br>Expérimentation du montage à polarité inva-<br>riable .....               | 16     | A. Amorçage .....                                                                     | 19     |
| I. Montage utilisé .....                                                                                                                                          | 16     | B. Rechargement des inducteurs .....                                                  | 19     |
|                                                                                                                                                                   |        | C. Rôle du mouvement du plateau pendant<br>l'étincelle .....                          | 20     |
|                                                                                                                                                                   |        | III. Résultats obtenus .....                                                          | 20     |
|                                                                                                                                                                   |        | A. Première série de mesures .....                                                    | 21     |
|                                                                                                                                                                   |        | B. Considérations relatives à la première série<br>de mesures .....                   | 21     |
|                                                                                                                                                                   |        | C. Deuxième série de mesures .....                                                    | 24     |
|                                                                                                                                                                   |        | D. Entraînement par moteur à couple constant .....                                    | 24     |
|                                                                                                                                                                   |        | E. Réversibilité de la machine .....                                                  | 25     |
|                                                                                                                                                                   |        | Conclusions .....                                                                     | 25     |
|                                                                                                                                                                   |        | Appendice .....                                                                       | 26     |
|                                                                                                                                                                   |        | Bibliographie .....                                                                   | 27     |

### DEUXIÈME THÈSE : Les isolants électriques nouveaux.





